

**Universidad Carlos III de Madrid.**

**Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras.**



**Grado en Ingeniería Mecánica.**

**Trabajo Fin de Grado.**

# **MODELIZACIÓN DE ESTRUCTURAS AUXÉTICAS.**

Autor: Raúl Jiménez Espada.

Tutor: Jorge López Puente.

JUNIO 2017

## RESUMEN

Este proyecto se centra en el estudio de las respuestas de una celda auxética reentrante frente a esfuerzos de tracción y compresión en función de sus parámetros geométricos. Para ello se dará a conocer como es una estructura auxética, los tipos, la historia y sus características principales. La modelización por elementos finitos ha sido verificada gracias al software informático *Abaqus 6.13*, facilitado por la Universidad Carlos III de Madrid, mediante el diseño de estructuras tipo *shell* creadas por extrusión.

Esta clase de estructuras, similares a lo que podría ser un panal de abejas convencional, ha recibido mucha atención recientemente y se ha demostrado que presentan algunas características únicas que proporcionan ventajas sobre los materiales de ingeniería convencionales. En este proyecto se tratan posibles aplicaciones en las que estas estructuras podrían ser de utilidad. Algunas de ellas ya están siendo estudiadas en la actualidad.

Además, con el fin de hacer el proyecto de la manera más real y profesional posible, dos apartados han sido destinados a temas legales de presupuesto de realización de este TFG y a las normativas asociadas al objeto de estudio.

# Índice

<b>RESUMEN .....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
1.1. DEFINICIÓN DE COEFICIENTE DE POISSON.....	9
1.2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LAS ESTRUCTURAS AUXÉTICAS.....	9
1.3. TIPOS DE ESTRUCTURAS GEOMÉTRICAS AUXÉTICAS .....	10
1.4. PROPIEDADES ÚNICAS DE LOS MATERIALES AUXÉTICOS .....	15
1.5. PROBLEMAS DE CONTACTO E IMPACTO DE LOS MATERIALES AUXÉTICOS.....	17
1.6. OBJETIVOS .....	18
<b>CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>19</b>
2.1. ANTECEDENTES .....	20
2.2. HISTORIA DEL COEFICIENTE DE POISSON.....	21
2.3. HISTORIA DEL COEFICIENTE DE POISSON NEGATIVO.....	21
2.4. APLICACIONES POTENCIALES .....	22
<b>CAPÍTULO III. MODELIZADO DE ESTRUCTURA AUXÉTICA EN ABAQUS.....</b>	<b>24</b>
3.1. INTRODUCCION .....	25
3.2. METODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF) .....	25
3.3. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURA REENTRANTE.....	26
3.4. MODELO ESTRUCTURAL CAD CON ABAQUS 6.13 .....	27
3.4.1. GEOMETRÍA.....	27
3.4.2. PROPIEDADES Y SECCIONES .....	28
3.4.3. CONDICIONES DE CONTORNO E IMPOSICIONES.....	29
3.4.4. MALLADO Y VISUALIZACIÓN .....	31
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
4.1. MÉTODO DE CÁLCULO .....	34
4.2. RESPUESTAS FRENTE A DESPLAZAMIENTOS TRACTORES .....	38
4.3. RESPUESTAS FRENTE A DESPLAZAMIENTOS COMPRESIVOS .....	40
4.4. RESPUESTAS FRENTE A VARIACIONES DE ESPESOR .....	41
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>44</b>
<b>TRABAJOS FUTUROS Y APLICACIONES.....</b>	<b>45</b>
<b>MARCO REGULADOR.....</b>	<b>47</b>
<b>ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>51</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.1</b> Deformación 2D de prisma sometido a carga para efectos positivos del coeficiente de Poisson. ....	9
<b>Figura 1.2</b> Deformación 2D de prisma sometido a carga para efectos negativos del coeficiente de Poisson. ....	10
<b>Figura 1.3</b> Deformación de red convencional hexagonal (a) y reentrante (b) sometida a esfuerzo de tracción. ....	11
<b>Figura 1.4</b> Estructuras con comportamiento auxético (1). ....	12
<b>Figura 1.5</b> Estructuras con comportamiento auxético (2). ....	12
<b>Figura 1.6</b> Estructuras 3D convencionales hexagonales (a) y reentrantes (b). ....	13
<b>Figura 1.7</b> Estructura auxética reentrante 2D (a), 3D (b) y celda unitaria 3D (c). ....	13
<b>Figura 1.8</b> Estructuras quirales (a) y metaquirales (b). ....	14
<b>Figura 1.9</b> Resistencia a abolladura de material convencional y material auxético. ....	16
<b>Figura 1.10</b> Célula estructural periódica reentrante convencional. ....	18
<b>Figura 2.1</b> Estructura tipo Sandwich. ....	22
<b>Figura 3.1</b> Simulación de elementos sometidos a esfuerzos con MEF. ....	25
<b>Figura 3.2</b> Parámetros de diseño para estructura auxética reentrante. ....	27
<b>Figura 3.3</b> Geometría estructura auxética en Abaqus. ....	28
<b>Figura 3.4</b> Condición de contorno I: set vertical-imposición movimiento en eje X. ....	30
<b>Figura 3.5</b> Condición de contorno II: puntos frontales de unión-imposición movimiento en eje Z. ....	30
<b>Figura 3.6</b> Condición de contorno III: set vertical sometido a desplazamientos tractores (A) y compresivos (B) en dirección del eje Y. ....	31
<b>Figura 3.7</b> Mallado de estructura auxética reentrante. ....	32
<b>Figura 3.8</b> Estructura auxética reentrante deformada tras desplazamientos tractores (A) y compresivos (B) en dirección del eje Y. ....	32
<b>Figura 4.1</b> Sentido de desplazamiento de “aletas” horizontales tras desplazamientos tractores (A) y compresivos (B) en dirección del eje Y. ....	34
<b>Figura 4.2</b> Ejemplo: Poisson vs deformación macroscópica a tracción para estructura auxética reentrante con ángulo de reentrada de 25° en régimen elástico. ....	36
<b>Figura 4.3</b> Ejemplo: Poisson vs deformación macroscópica a tracción para estructura auxética reentrante con ángulo de reentrada de 25°. ....	37
<b>Figura 4.4</b> Ejemplo: Poisson vs deformación macroscópica a compresión para estructura auxética reentrante con ángulo de reentrada de 25°. ....	38

<b>Figura 4.5</b> Poisson vs deformación macroscópica global a tracción para estructura auxética reentrante. ....	39
<b>Figura 4.6</b> Poisson vs deformación macroscópica global a tracción para estructura auxética reentrante. Zoom región coeficiente de Poisson negativo. ....	40
<b>Figura 4.7</b> Poisson vs deformación macroscópica global a compresión para estructura auxética reentrante. ....	41
<b>Figura 4.8</b> Poisson vs deformación macroscópica a tracción para estructura auxética reentrante con $\theta = 35^\circ$ sometida a variaciones de espesor. ....	42
<b>Figura 4.9</b> Poisson vs deformación macroscópica a compresión para estructura auxética reentrante con $\theta = 35^\circ$ sometida a variaciones de espesor. ....	42
<b>Figura 4.10</b> Tensiones vs desplazamiento vertical para estructura auxética reentrante con $\theta = 35^\circ$ sometida a variaciones de espesor. ....	43
<b>Figura 5.1</b> Material auxético activado por calor. Experimento MIT. ....	45
<b>Figura 5.2</b> Nido de abeja de aluminio (honeycomb). ....	46

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Ejemplo: Cálculo de coef. Poisson y deformación macroscópica en estructura con ángulo de reentrada $25^\circ$ y régimen elástico. ....	35
<b>Tabla 2.</b> Costes por mano de obra. ....	49
<b>Tabla 3.</b> Coste de licencias de software. ....	49
<b>Tabla 4.</b> Coste de material. ....	49
<b>Tabla 5.</b> Costes parciales. ....	50
<b>Tabla 6.</b> Costes totales. ....	50



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

- 1.1. Definición de coeficiente de Poisson.
- 1.2. Características básicas de las estructuras auxéticas.
- 1.3. Geometría estructural y diferentes modelos.
- 1.4. Objetivos.



## 1.1. DEFINICIÓN DE COEFICIENTE DE POISSON

En términos generales, lo que nuestra experiencia nos dice es que cuando estiramos un material, por ejemplo, una goma elástica, dicho material no solo se alarga en la dirección de la carga aplicada, sino que su sección transversal se hace más delgada. De la misma forma, un material bajo los efectos de una carga a compresión tiende a expandirse lateralmente y a ensanchar su sección transversal. En ambos casos el comportamiento del material se rige por una de las principales propiedades mecánicas de los materiales, llamado *Coefficiente de Poisson* ( $\nu$ ).

El coeficiente de Poisson es una constante elástica que se define como la relación negativa de la deformación transversal y la deformación axial (longitudinal) en la dirección de la carga, según se muestra en la siguiente formula:

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}}$$

En la Figura 1.1 se muestra de una forma más gráfica la explicación de la formula que da nombre al coeficiente de Poisson.

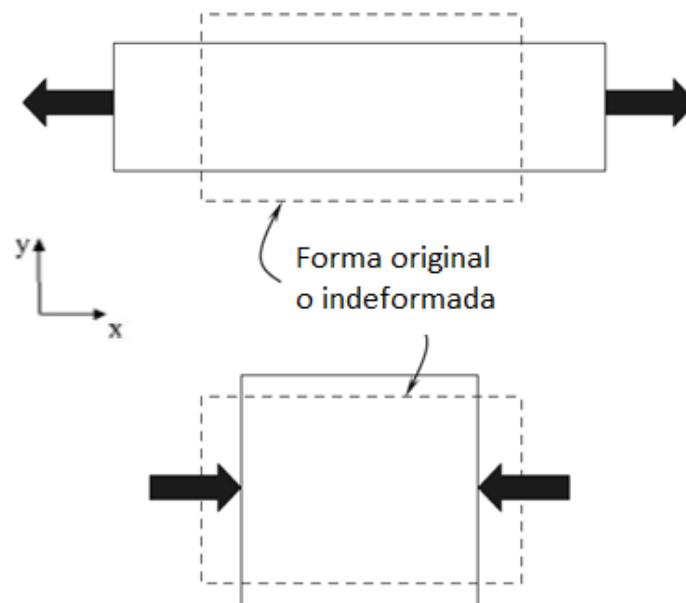


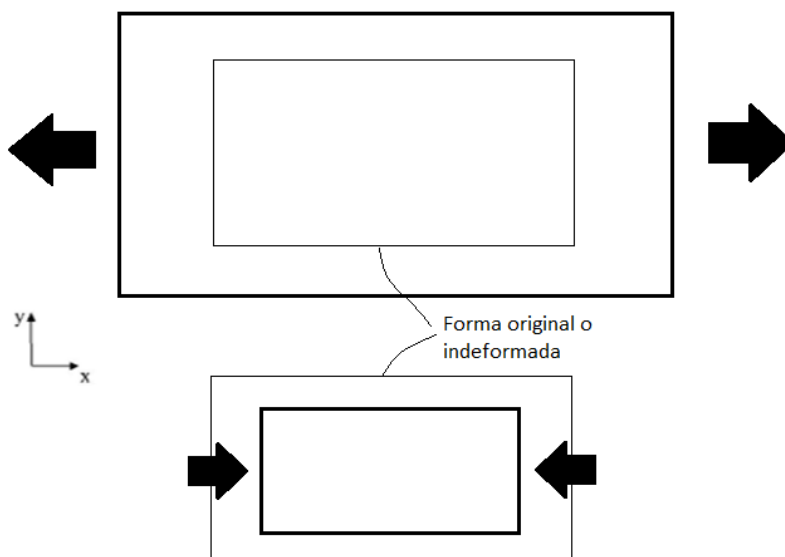
Figura 1.1 Deformación 2D de prisma sometido a carga para efectos positivos del coeficiente de Poisson.

## 1.2. CARÁCTERÍSTICAS BÁSICAS DE LAS ESTRUCTURAS AUXÉTICAS

Todos los materiales comunes tienen relaciones Poisson positivas, es decir, los materiales se contraen transversalmente bajo cargas a tracción y se expanden lateralmente cuando se comprimen en una dirección, como se puede apreciar en la Figura 1.1.

Una razón de Poisson negativa se ha tratado como un parámetro anormalmente elástico durante mucho tiempo. Sin embargo, los coeficientes de Poisson negativos son teóricamente posibles.

En la Figura 1.2 se representa un material con coeficiente de Poisson negativo, con forma de prisma rectangular, sometido tanto a esfuerzos de tracción y compresión respectivamente.



*Figura 1.2 Deformación 2D de prisma sometido a carga para efectos negativos del coeficiente de Poisson.*

Como se puede observar en la Figura 1.2, la diferencia de este tipo de materiales (anisótropos) respecto a materiales comunes con coeficientes de Poisson positivos es que el alargamiento transversal es inverso. Es decir, al traccionar o estirar el material la sección transversal ensancha, mientras que al comprimirlo ésta área disminuye.

Para un material isótropo (cuerpos cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección en que son examinadas) el rango permitido de la relación de Poisson es de -1 a 0,5, basado en la consideración termodinámica de la energía de deformación en la teoría de la elasticidad. Sin embargo, para los materiales anisótropos, estos límites no se aplican.

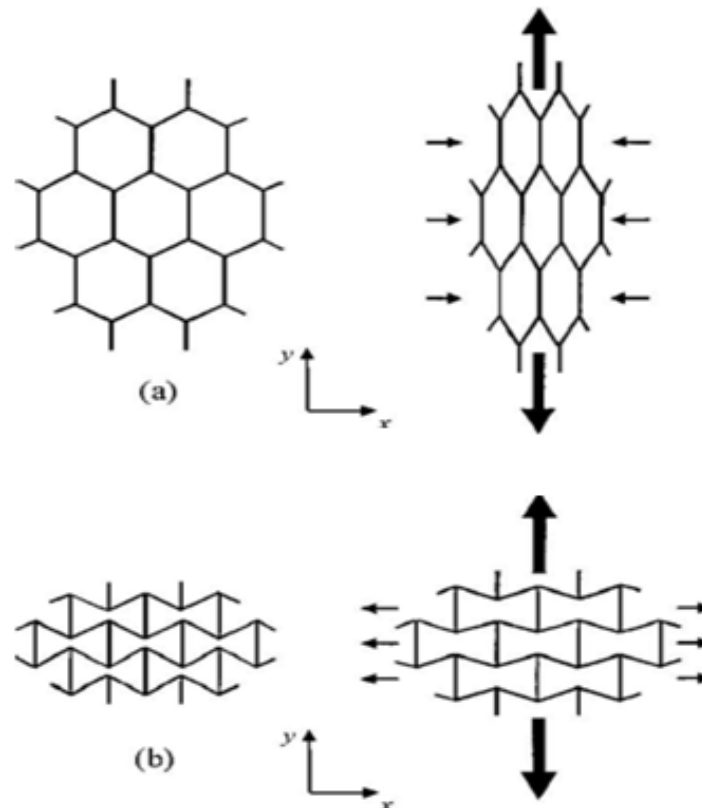
Fue así como, denominados por Evans (1991), Todos los materiales y estructuras de coeficiente de Poisson negativos serían llamados materiales auxiliares o auxéticos.

### 1.3. TIPOS DE ESTRUCTURAS GEOMÉTRICAS AUXÉTICAS

Un ejemplo típico de cómo la relación de Poisson puede ser aplicada en el diseño de una arquitectura hexagonal se puede apreciar en la Figura 1.3. Aquí la estructura, en forma de panal de abejas 2D, se deforma por articulaciones que forman la red o conjunto de celdas. Para celdas individuales que tienen la geometría hexagonal convencional (Figura 1.3.a) vemos

que éstas se alargan a lo largo del eje “y” y se cierran a lo largo del eje “x” en respuesta al estiramiento de la red en la dirección “y”, dando una relación de Poisson positiva.

Si mantenemos el mismo mecanismo de deformación, donde se estira la celda en sentido positivo del eje y, pero modificando la geometría de dicha celda hexagonal para adoptar la estructura de reentrada mostrada en la figura 1.3.b, la alineación de las articulaciones diagonales a lo largo de la dirección horizontal hace que estas se muevan de forma que la estructura se expanda tanto en sentido del eje horizontal como vertical, dando por resultado el efecto auxético.



*Figura 1.3 Deformación de red convencional hexagonal (a) y reentrante (b) sometida a esfuerzo de tracción.*

Algunos ejemplos de geometrías microestructurales que dan lugar al comportamiento auxético 2D se muestran en la Figura 1.4 y 1.5. En estos ejemplos, así como en otras geometrías, también es necesaria la presencia de rotación y extensión de cada lado en la celda unitaria para que se manifieste el comportamiento auxético.

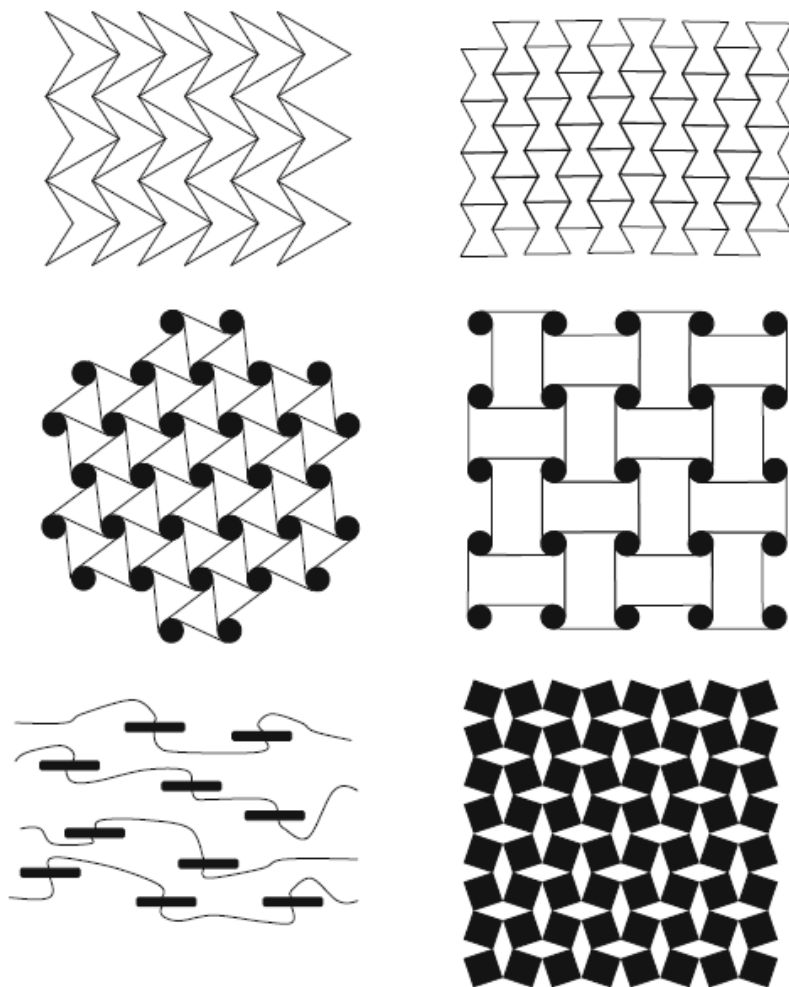


Figura 1.4 Estructuras con comportamiento auxético (1).

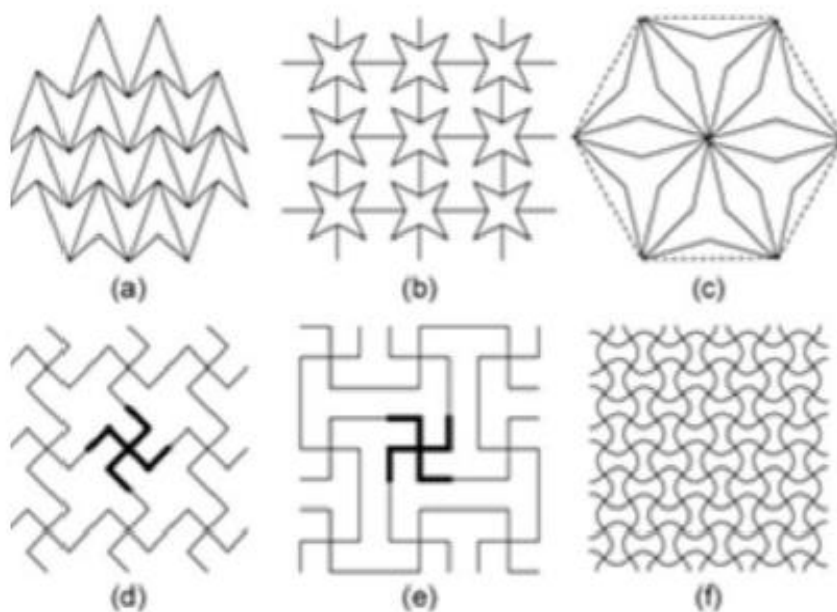


Figura 1.5 Estructuras con comportamiento auxético (2).

Como se puede observar en la figura 1.5.c se ha sugerido una estructura cuya red tenga una geometría en forma de panal de abejas, con celdas hexagonales, similar a la vista anteriormente en la Figura 1.3.a solo que con mejores propiedades isotrópicas planas debido a la simetría estructural interior a lo largo de las direcciones radiales.

Además de las estructuras reentrantes 2D, también pueden existir estructuras reentrantes 3D y producir efectos auxéticos, como se muestra en la Figura 1.6. Se ha utilizado una célula reentrante 3D (Figura 1.6.b) en la que las articulaciones sobresalen hacia adentro para explicar el comportamiento auxético de las espumas auxéticas, considerando a éstas en efectos generales como si se tratasen de esferas, donde las articulaciones o nervios que sobresalen verticalmente están bajo tensión, los nervios en las direcciones laterales tenderán a moverse hacia fuera, llevando a expansión lateral. Por otra parte, cuando se aplica la compresión, los nervios se doblarán hacia adentro, dando por resultado la contracción lateral en respuesta a la compresión axial.

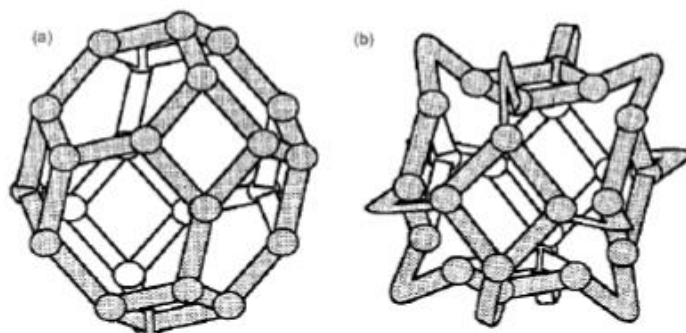


Figura 1.6 Estructuras 3D convencionales hexagonales (a) y reentrantes (b).

No es necesario que estas estructuras presenten configuraciones esféricas. En la Figura 1.7.a se muestra la estructura auxética reentrante 2D de panal. A diferencia de algunas de las estructuras auxéticas 2D, las estructuras de panal reentrantes se pueden modelar fácilmente en estructuras 3D con una mínima modificación en el diseño y tienen el potencial de exhibir comportamiento auxético en las tres direcciones. La estructura final puede ser representada por la celda unitaria mostrada en la Figura 1.7.b, donde se puede observar que los ejes  $x_1$  y  $x_2$  son indistinguibles debido a la simetría.

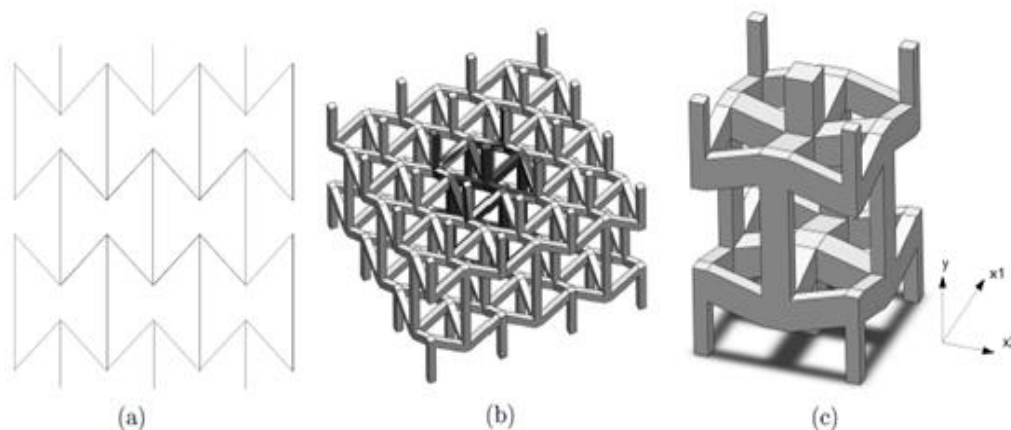


Figura 1.7 Estructura auxética reentrante 2D (a), 3D (b) y celda unitaria 3D (c).

Otra clase de estructuras que se han desarrollado para las redes auxéticas son las llamadas estructuras quirales. Como se muestra en la Figura 1.8, en este tipo de estructuras, las unidades quirales básicas (destacadas en líneas gruesas) se forman en primer lugar conectando ligamentos rectos a nodos centrales que pueden ser círculos o rectángulos u otras formas geométricas. Los efectos auxéticos se logran envolviendo o desenrollando los ligamentos alrededor de los nodos en respuesta a las fuerzas aplicadas. Este tipo de estructura es la más estudiada a nivel matemático y computacional. Según las investigaciones teóricas y experimentales, la razón de Poisson de la estructura quiral en la Figura 1.8.a bajo deformaciones planas es alrededor de -1. En contraste con la mayoría de otras estructuras auxéticas, esta estructura puede mantener un alto efecto auxético sobre un rango significativo de deformaciones.

Basándose en la estructura 1.8.a, se ha desarrollado recientemente una nueva clase de estructura denominada "metaquiral" (ver Figura 1.8.b). En este tipo de estructura, las mismas unidades quirales (también denominadas bloques de construcción quirales) o unidades simétricas pueden conectarse entre sí para formar diferentes estructuras quirales. Por ejemplo, la estructura de la Figura 1.8.b se forma conectando los bloques simétricos donde el nodo en cada bloque de construcción quiral es un rectángulo. Aunque los bloques de construcción pueden ser polígonos con un número arbitrario de bordes, sólo pueden usarse los formados con 3, 4 o 6 ligamentos para construir estructuras periódicas de relleno de espacio. Además, es evidente que los efectos auxéticos de una estructura quiral dada dependen de la forma del nodo y la longitud de los ligamentos adheridos.

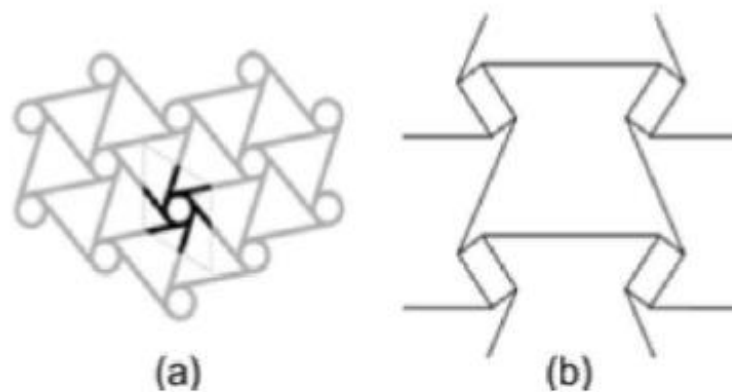


Figura 1.8 Estructuras quirales (a) y metaquirales (b).

Este tipo de estructura posee varias ventajas únicas. Primero, la geometría podría ser modelada fácilmente; en segundo lugar, la red modelada tiene altos grados de interconexión en los que cada puntal de la estructura está compartido por al menos dos celdas unitarias y, en el caso de los puntales verticales, tres celdas unitarias; tercero, la estructura no tiene quiralidad y tiene grados de simetría relativamente altos.

## 1.4. PROPIEDADES ÚNICAS DE LOS MATERIALES AUXÉTICOS

Debido al efecto de la relación de Poisson negativa, los materiales auxéticos presentan una serie de propiedades ventajosas en comparación con los materiales convencionales, tales como un mayor módulo de cizallamiento, mayor resistencia a la indentación, mayor tenacidad a la fractura y mayor absorción de energía. Conocidas las ventajas de éstos, decimos que el efecto auxético puede usarse para ajustar las propiedades mecánicas de una estructura con el fin de alcanzar un rendimiento mejorado de la misma.

En la teoría de elasticidad, el comportamiento elástico del material se expresa mediante cuatro constantes:

- El módulo de elasticidad o módulo de Young (E): Constante elástica dependiente del cociente entre la tensión y deformación resultante en un material sometido a un ensayo a tracción.
- El módulo de cizallamiento (G): Caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico cuando se aplican esfuerzos cortantes.
- El módulo de masa o compresibilidad (K): Mide la resistencia de un material a compresión uniforme y, por tanto, indica el aumento de presión requerido para causar una disminución unitaria de volumen.
- La relación o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ): Relación negativa de la deformación transversal y la deformación axial en la dirección de la carga

Para los materiales isótropos, las cuatro constantes no son independientes, sino que están relacionadas entre sí por las siguientes ecuaciones:

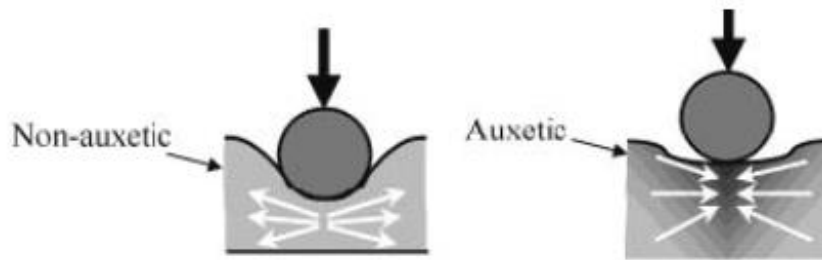
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}; K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

La mayoría de los materiales estructurales requieren un K mayor que G, de tal forma que si podemos cambiar la microestructura de un material de tal manera que E permanezca constante, pero  $\nu$  cambie, podemos alterar los valores de K y G. Por ejemplo, al disminuir  $\nu$  hasta valores negativos, se puede obtener un módulo de cizallamiento (G) muy alto con respecto al módulo de masa (K). En otras palabras, el material se hace difícil de cortar, pero es fácil deformarse volumétricamente.

Una vez conocidas las fórmulas de G y K, se llega a la conclusión de que la dureza puede aumentarse en un material auxético debido a la relación de Poisson negativa. Cuando un objeto golpea un material auxético y lo comprime en una dirección, el material auxético también se contrae lateralmente, es decir, el material “se concentra” en la región del impacto como se ilustra en la Figura 1.9. Esto crea un área de material más denso que es resistente frente a la indentación. Este fenómeno se puede explicar teóricamente. La resistencia a la indentación o dureza de un material isotrópico es proporcional a  $E/(1-\nu^2)$  cuando se asume un indentador con una distribución de presión uniforme. El rango de  $\nu$  para los materiales isotrópicos 3D es de -1 a 0.5. Así, el término  $(1-\nu^2)$  se aproximará a 0 cuando  $\nu$  se aproxima a



-1. De esta manera, para un material isotrópico con un valor dado de  $E$ , la resistencia a la indentación aumenta hacia el infinito con una relación de Poisson cada vez más negativa.



*Figura 1.9 Resistencia a abolladura de material convencional y material auxético.*

Los materiales auxéticos también muestran una superioridad general en la absorción de energía en comparación con los materiales convencionales. Scarpa [1,2] investigó los comportamientos tensión-deformación de espumas de poliuretano rígido convencional y el material auxético transformado correspondiente bajo trituración dinámica. Los resultados indicaron que la espuma de poliuretano rígida convencional no mostraba ninguna resiliencia notable bajo impacto, pero la espuma auxética mostró una resiliencia significativamente aumentada bajo carga dinámica. Las curvas de tensión-deformación medidas indicaron que el comportamiento dinámico de los materiales auxéticos transformados era como un sólido celular de poliuretano de alta densidad con baja sensibilidad a la velocidad de deformación. Para la misma deformación, la tensión en el material auxético es en general dos órdenes de magnitud mayor que la de la espuma convencional.

Estos resultados sugieren la posibilidad de utilizar las formas de espumas transformadas en aplicaciones de impacto, tales como usos industriales y equipamiento para envases y embalajes. Scarpa también observó propiedades de amortiguación mejoradas de los materiales auxéticos transformados sobre las formas convencionales originales [3,4]. Las muestras de espuma auxéticas se obtuvieron a partir de una forma de poliuretano gris de celda abierta (off-the-shelf open cell grey polyurethane) siguiendo un proceso de fabricación basado en la deformación mecánica en un molde en un horno a temperatura controlada. Las propiedades de los materiales viscoelásticos, incluyendo el módulo de almacenamiento y el factor de pérdida, se midieron para pequeñas historias de deformaciones sinusoidales utilizando una máquina de tracción de análisis viscoelástico. Las mismas muestras también fueron probadas en un tubo de impedancia acústica para medir la absorción acústica y la resistencia acústica específica. La histéresis de la curva de carga se midió para determinar los factores de pérdida de amortiguación para las diversas espumas. Las mediciones indicaron que las espumas auxéticas tenían factores de pérdida 20% mayores que las de las espumas convencionales. Sin embargo, también se observó que debido a que los materiales auxéticos necesitan porosidad sustancial en general, son menos rígidos que el sólido del que se fabrican. Eventualmente, esto causa limitaciones en las aplicaciones estructurales de los materiales con una relación de Poisson negativa. Por lo tanto, para aplicaciones que requieran amplios soportes de cargas, no son la mejor elección [5].



## 1.5. PROBLEMAS DE CONTACTO E IMPACTO DE LOS MATERIALES AUXÉTICOS

Un modelo analítico para problemas de contacto entre dos cuerpos blandos homogéneos isotropos fue propuesto por Wang y Lagos [6] para simular el contacto entre las nalgas humanas y el cojín de un asiento. Se permitió que la relación de Poisson del material del que estaba hecho el cojín fuera negativa. Las nalgas humanas fueron modeladas como una esfera ideal de un material incompresible con un bajo módulo de cizallamiento. Los análisis realizados por el modelo de contacto Hertz y un modelo de elasticidad 3D de grosor finito demostraron que el uso de cojines con relación de Poisson negativos podría reducir la presión de contacto, dando como resultado que el empleo de estos cojines con relación de Poisson negativa podrían ser beneficiosos, previniendo y reduciendo el riesgo a posibles dolores, úlceras e incomodidades, para las personas sentadas sobre los mismos.

Recientemente, la respuesta estructural de una estructura de relación de Poisson negativa con células hexagonales regulares reentrantes se sometió a una investigación de Yang [7] a través de simulaciones numéricas usando LS-DYNA. El fondo del modelo fue sujetado y la parte superior fue cargada por un cuerpo rígido de masa y velocidad conocidas. Se utilizaron dos algoritmos de contacto diferentes, en los que se empleó contacto automático de superficie única para tratar el contacto entre las paredes celulares altamente deformadas durante el proceso de carga y se aplicó el contacto automático de nodo a superficie entre la estructura de relación de Poisson negativa y la masa. Los resultados numéricos indicaron que, durante el proceso de deformación, la estructura reentrante se deformó en patrones de plegado estable y progresivo. Algunas deformaciones locales ocurrieron en la etapa temprana, más adelante las deformaciones comenzaron a propagarse a través del modelo hasta que toda la estructura fue compactada. El análisis dio como resultado una curva de carga-desplazamiento a partir de la cual se pudo evaluar la absorción de energía de la estructura de la relación de Poisson negativa.

El modelo de elementos finitos fue construido usando el elemento como el que se observa en la Figura 1.10. Antes de los análisis dinámicos, los modelos de elementos finitos se verificaron mediante análisis estáticos lineales y no lineales, y las propiedades materiales equivalentes numéricamente predichas se compararon con las soluciones analíticas con un acuerdo cercano. Los resultados no lineales fueron razonables e indicaron que las relaciones de Poisson de los materiales auxéticos son sensibles al nivel de deformaciones debido a la variación de la geometría auxética.

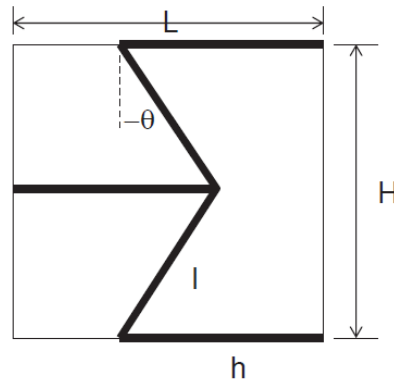


Figura 1.10 Célula estructural periódica reentrante convencional.

Tras la verificación de los modelos de elementos finitos, se construyó una matriz de prueba para el presente estudio paramétrico, en el que se propusieron más de sesenta casos de prueba, cubriendo una amplia gama de geometría de panel y direcciones de impacto. Los resultados parecen sugerir que los materiales que tienen menor ángulo  $\theta$  son más eficaces como capa protectora y estos efectos son más significativos bajo impacto vertical.

## 1.6. OBJETIVOS

El objetivo del presente estudio es investigar el efecto de los parámetros geométricos de las estructuras auxéticas de un panel formado por estructuras reentrantes convencionales como la que se aprecia en la Figura 1.7.a, sobre las propiedades mecánicas, estando éstas sometidas a cargas de impacto. Este estudio es posible gracias al software informático ABAQUS, donde se modelará una estructura auxética 2D con profundidad en el plano Z.

Actualmente ya se experimentado de forma física con algunos modelos previos a este estudio, aprovechando procesos de fabricación en impresión 3D disponibles en la facultad, como es la fusión por filamento fundido (FFF). Este proyecto puede ser empleado en un futuro como pauta para futuras aplicaciones de estructuras auxéticas reentrantes en 3D y generar una metodología para futuros diseños de otras estructuras celulares periódicas similares.

No obstante, Los materiales auxéticos y sus coeficientes negativos de Poisson no han sido completamente entendidos. De éstos se espera que tengan interesantes propiedades mecánicas, tales como alta absorción de energía, tenacidad a la fractura, resistencia a la indentación y mejores módulos de cizallamiento, que pueden ser útiles en algunas aplicaciones. Por tanto, recientemente, el diseño y la fabricación de materiales auxéticos y el análisis de sus relaciones negativas de Poisson han generado gran interés en el mundo de la investigación científica.

Para finalizar el proyecto, en éste se expone un marco regulador desde el punto de vista investigación científica, tratando apartados de estándares técnicos, si son aplicables o no acorde a la tecnología desarrollada... etc. A demás, se verá un estudio secundario del presupuesto de la elaboración del TFG en el apartado de entorno socio-económico.

# CAPÍTULO II

## ESTADO DEL ARTE

- 2.1. Antecedentes.
- 2.2. Historia del coeficiente de Poisson.
- 2.3. Historia del coeficiente de Poisson negativo.
- 2.4. Aplicaciones potenciales.

## 2.1. ANTECEDENTES

La palabra "auxética" viene de la palabra griega "auxetikos" (transliterada de αὐξητικός), que significa "aquello que tiende a aumentar", y se basa en la palabra griega "auxesis" (transliterada de αὔξις), que es un sustantivo que toma el significado de "incrementar". Hoy en día, nombramos así a determinadas estructuras que, cuando se estiran se vuelven más gruesas en la dirección normal a la dirección de carga aplicada. Como se explica en el capítulo I, las estructuras auxéticas presentan relaciones de Poisson negativas en una o más direcciones.

Desde hace más de 40 años se han observado relaciones de Poisson negativas en algunos materiales anisótropos presentes en la naturaleza, dando como ejemplos el mineral conocido como cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ), el grafito pirolítico (Garber, 1963), algunos tipos de zeolitas (silicatos de zeolita) y el cadmio cristalino (Li, 1976). Estos cristales poseen una compleja microestructura donde se evidencian altos niveles de resistencia al esfuerzo cortante pero carecen de resistencia en cuanto a la deformación volumétrica, por lo tanto, su módulo de rigidez ( $G$ ) es mucho mayor que su módulo volumétrico ( $K$ ). Sin embargo, la primera estructura auxética se informó en 1987 [9]. No siendo hasta 1991 cuando, denominados por Evans, todos los materiales con relación de Poisson negativa serían nombrados como materiales auxiliares o auxéticos.

Algunos materiales, especialmente procesados, presentan comportamiento auxético debido a su microestructura. En la mayoría de los casos, es el diseño estructural el que crea el propio comportamiento auxético. Este comportamiento, aparentemente extraño, atrajo la atención de muchos investigadores, y en las últimas dos décadas ha habido una gran cantidad de trabajo dedicado a las estructuras auxéticas. En la mayoría de los estudios, las estructuras auxéticas fueron modeladas como varios tipos de estructuras de malla o espuma, con extremos o ligamentos característicamente invertidos que contribuyen al comportamiento auxético. Las estructuras auxéticas tienen algunas propiedades que las hacen atractivas a la vez que diferentes frente a las estructuras de malla regulares. Estas propiedades incluyen:

- Gran módulo de corte y resistencia al corte.
- Buena resistencia a la indentación.
- Forma sinclástica bajo momento de flexión.
- Alta resistencia a la fractura.
- Excelente transmisión acústica y electromagnética.

Estas propiedades muestran las promesas de las estructuras auxéticas en diversas aplicaciones. Sin embargo, debido a las limitaciones de los métodos de fabricación convencionales, las propiedades de las partes y elementos auxéticos son todavía en gran medida incontrolables, de tal forma que ha habido pocas aplicaciones reales informadas hasta la fecha. No obstante, aunque difícil, la fabricación de materiales y estructuras artificiales que presentan relaciones de Poisson negativas ha tenido éxito. Algunos ejemplos son los compuestos laminados, polímeros microporosos, panales bidimensionales y espumas tridimensionales.

## 2.2. HISTORIA DEL COEFICIENTE DE POISSON

La temprana observación del efecto del estiramiento y la contracción lateral resultante fue realizada por Young en 1807 durante una de sus conferencias sobre filosofía natural y artes mecánicas. Basado en la teoría de la interacción molecular, Poisson en 1827 derivó un valor constante de  $\nu = 1/4$ , apoyado por la medición indirecta de  $\nu \approx 0,357$  de Cagniard de la Tour para el caso de varilla de latón. Adoptando el método de Cagniard de la Tour, Wertheim (1848) midió la relación de Poisson de  $\nu = 1/3$  tanto para el latón como para el vidrio. Midiendo el módulo de Young ( $E$ ) y el módulo de cizallamiento ( $G$ ), Kirchhoff en 1859 obtuvo la relación de Poisson de varios metales usando la siguiente ecuación:

$$\frac{E}{G} = 2(1 + \nu)$$

Éstas, y mediciones posteriores de la relación de Poisson, forman la base experimental de que la relación de Poisson no es una constante, sino que varía para diferentes materiales. Teóricamente, Cauchy en 1828 demostró que se requieren dos módulos independientes de elasticidad para caracterizar el comportamiento elástico de los sólidos isotrópicos, como se explica en el capítulo 1.4, lo que implica que la relación de Poisson debe ser diferente para diferentes materiales.

## 2.3. HISTORIA DEL COEFICIENTE DE POISSON NEGATIVO

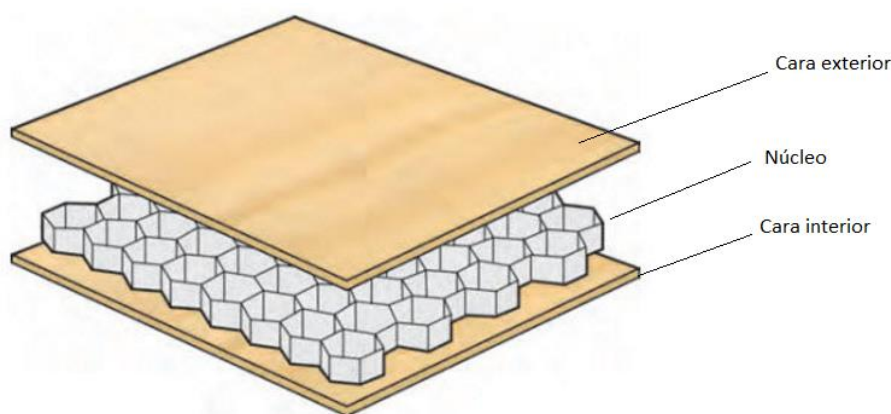
Al restablecer las relaciones de Cauchy, Saint-Venant en 1848 parece ser el primero en sugerir que la proporción de Poisson podría ser negativa en sólidos anisotrópicos. Basándose en la teoría matemática de la elasticidad, las restricciones termodinámicas impuestas a la ley constitutiva de los sólidos elásticos dieron los límites de la relación de Poisson como  $-1 \leq \nu \leq 0,5$  para los sólidos isotrópicos (Fung 1965). Landau y Lifshitz (1970) comentaron, en una nota de pie de página, que la relación de Poisson entre 0 y  $1/2$  sólo en la práctica, pero no termodinámicamente necesaria, es una indicación cautelosa de la posibilidad de que los sólidos posean una relación de Poisson negativa. Las evidencias experimentales sobre la proporción negativa de Poisson fueron dadas para las piritas (Love 1927), monocristales (Voigt 1910, Hearmon 1946, Simmons y Wang 1971), películas ferromagnéticas (Poporeka y Balagurov 1969), tejidos biológicos (Veronda y Westmann 1970) y Cristales FCC (Milstein y Huang 1979). Un renacimiento para el estudio de los materiales de relación de Poisson negativos en los años ochenta vio evidencia adicional, ya fuese por medición experimental o por simulación computacional. Estas investigaciones incluyen cuartos de cuarzo  $\alpha$  (Kittinger 1981), panales hexagonales reentrantes (Gibson, 1982), estructuras tridimensionales isotrópicas construidas con varillas, bisagras y resortes que mantienen su forma, por ejemplo  $\nu = -1$  (Almgren 1985), Moléculas hexagonales en red 2D (Wojciechowski 1987, 1989; Wojciechowski y Branka 1989) y materiales celulares (Lagos 1987a, b; Caddock y Evans 1989; Evans y Caddock 1989).

La relación de Poisson en el plano negativo también ha sido referenciada en laminados compuestos (Tsai y Hahn 1980). Herakovich en 1984 utilizó una combinación de teoría de laminación 2D y ecuaciones constitutivas anisotrópicas en 3D para obtener la relación de Poisson de laminados finos a través del espesor. Sun y Li (1988) adoptaron constantes elásticas 3D eficaces para laminados gruesos para exhibir la relación de Poisson negativa en ciertas direcciones.

## 2.4. APLICACIONES POTENCIALES

Debido a las propiedades únicas de las estructuras auxéticas, éstas tienen un gran potencial para muchas aplicaciones diferentes. Se han propuesto aplicaciones desde tapones de botellas de vino [8] hasta núcleos de paneles sandwich [9]. Las estructuras auxéticas podrían ser utilizadas como absorbedoras de grandes golpes, cojines de asientos, sujecciones, filtros de aire y filtros de masa. También podrían utilizarse en dispositivos piezoeléctricos para maximizar la conversión de energía acústica a eléctrica [10].

Las estructuras tipo Sandwich, como la que se observa en la Figura 2.1, utilizan ampliamente diversas propiedades de estructuras de malla y espumas. En muchas aplicaciones, la rotura del núcleo es la principal causa del fallo estructural. Por otra parte, es muy deseable que las estructuras de este tipo absorban más energía y muestren doblados más conformes cuando se someten a momentos de flexión. Las estructuras auxéticas podrían proporcionar todas las ventajas de sus propiedades aún siendo configuradas en paneles o estructuras tipo sandwich, lo que las convierte en candidatas ideales para las estructuras de núcleo.



*Figura 2.1 Estructura tipo Sandwich.*

Las estructuras auxéticas también podrían ser potencialmente usadas en estructuras a gran escala. La rigidez superior de la estructura auxética frente a otras estructuras convencionales hace que sean deseables en el diseño de puentes y edificios de gran altura. Actualmente los diseños estructurales predominantes se basan en el triángulo debido a su rigidez y estabilidad. Sin embargo, desde la perspectiva del máximo rendimiento, el triángulo

no es el diseño estructural de malla más eficiente. Las propiedades de las estructuras auxéticas podrían conducir a la solución de este dilema.

Uno de los obstáculos más grandes para las estructuras auxéticas es que no ha habido un método de fabricación hasta la fecha que pudiera controlar suficientemente las propiedades de las estructuras auxéticas. El ser humano sólo ha logrado producir una estructura que exhibe comportamiento auxético en partes de espuma y, debido a la naturaleza aleatoria de la estructura de espuma, es muy difícil controlar las dimensiones y geometrías de cada celda unitaria dentro de la propia estructura. Esto hace que sea difícil tener algún control sobre las propiedades mecánicas. Por lo tanto, es necesario desarrollar un método para fabricar estructuras auxéticas con parámetros de diseño predeterminados, permitiendo así la evaluación de las estructuras en comparación con los estudios teóricos.

# CAPÍTULO III

## MODELIZADO DE ESTRUCTURA AUXÉTICA EN ABAQUS

- 3.1. Introducción.
- 3.2. Método de elementos finitos (MEF).
- 3.3. Características estructura reentrante.
- 3.4. Modelo estructural CAD con ABAQUS 6.13.
  - 3.4.1. Geometría.
  - 3.4.2. Propiedades y secciones.
  - 3.4.3. Condiciones de contorno e imposiciones.
  - 3.4.4. Mallado y visualización.

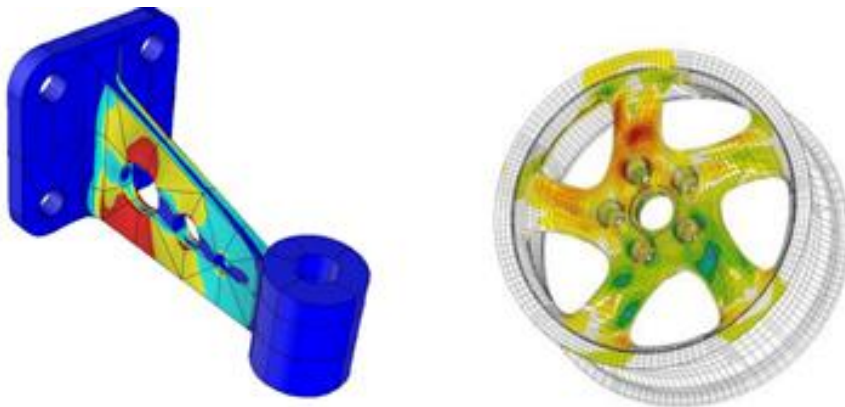


### 3.1. INTRODUCCION

En este capítulo se presenta de una manera más detallada, puesto que es de los objetivos principales del proyecto, los pasos a seguir en el procedimiento que conducirá al análisis estructural en *Abaqus* de una estructura auxética reentrante 2D, asumiendo distintas hipótesis y simplificaciones que facilitarán la tarea sin alejar demasiado el resultado de la realidad. Estos pasos son: introducción al método de elementos finitos, explicación de la estructura a diseñar y creación del modelo en CAD utilizando el software informático *Abaqus 6.13*.

### 3.2. METODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

El Método de los elementos finitos, conocido también como MEF, es una herramienta muy utilizada en el mundo de la ingeniería. El MEF se utiliza en el diseño de productos y en su mejora continua, en aplicaciones de la industria y en la simulación de sistemas físicos, entre otros. La complejidad de problemas a los que se puede adaptar este método ha aumentado notablemente desde sus inicios, estando presente en la actualidad en casi todos los ámbitos de la ingeniería.



*Figura 3.1 Simulación de elementos sometidos a esfuerzos con MEF.*

En definitiva, la principal función del método de los elementos finitos es la de resolver problemas reales, lo cual sería prácticamente imposible a través de métodos convencionales de cálculo, permitiendo así realizar diseños cuyos resultados se aproximan en gran medida a la realidad, evitando de esta manera realizar experimentos con prototipos, en la gran mayoría de los casos, destructivos, lo que implica un gran ahorro de tiempo y dinero. *Abaqus* permite al usuario la obtención de los resultados de dicho cálculo, pudiendo observar el comportamiento de cuerpo sometido a ciertas cargas o, en este caso, desplazamientos.

La presencia de geometrías complejas o cargas irregulares complican la resolución exacta de las ecuaciones de la Elasticidad, en cuyo caso se suele recurrir a métodos numéricos que proporcionan una solución aproximada de las ecuaciones de gobierno como el método de Rayleigh-Ritz, el método de los elementos de contorno y el método de los Elementos Finitos.

En el Método de los Elementos Finitos, el concepto de discretización consiste en sustituir la estructura continua original por un cierto número de elementos independientes, denominados elementos finitos o discretos, unidos entre sí por un número finito de puntos o nodos. Para cada elemento finito estudiado aisladamente se pueden determinar las ecuaciones que lo gobiernan, hecho que es posible dada la sencillez de su forma, debido a que se conocen las ecuaciones que rigen el comportamiento físico del modelo.

Gracias a estas divisiones y las relaciones entre ellas, se puede convertir el problema en un conjunto de elementos con un número finito de grados de libertad, para su posible resolución. Para realizar un cálculo mediante un programa MEF, son necesarias tres fases:

1. Preproceso: esta fase consiste en la definición de la geometría del modelo, además de definir las condiciones de contorno y cualquier valor que garantice mayor aproximación de los resultados.
  - Propiedades del material.
  - Ensamblaje de las piezas del modelo.
  - Definición de los contactos entre cuerpos.
  - Aplicación de cargas y/o presiones sobre el cuerpo.
  - Generación de la malla.
2. Cálculo: se basa en realizar los cálculos necesarios para generar la solución del problema. Se suele decidir la configuración de los parámetros del cálculo, el número de iteraciones y el tipo de cálculos a realizar.
  - Selección de tipos de cálculo a realizar.
  - Selección de los parámetros de cálculo.
  - Definir número de iteraciones del problema.
3. Postproceso: en esta última fase se tratan los resultados obtenidos de la fase anterior de cálculo, expresando los resultados con representaciones gráficas y tablas, exponiendo así los términos del problema de una manera mucho más sencilla y visual.

### 3.3. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURA REENTRANTE

El objetivo del presente estudio es investigar el efecto de los parámetros geométricos de las estructuras auxéticas de un panel formado por estructuras reentrantes convencionales simples como la que se aprecia en la Figura 3.2, sobre las propiedades mecánicas o propios efectos auxéticos, estando éstas sometidas a desplazamientos de tracción y compresión.

Antes de comenzar, se debe tener en cuenta que existen 4 parámetros de diseño primario para la estructura de panel reentrante que definen a el coeficiente de Poisson: la longitud inicial entre extremos longitudinales  $H_0$ , de los extremos verticales  $V_0$ , el ángulo reentrante  $\theta$  y el espesor de la estructura  $e$ .

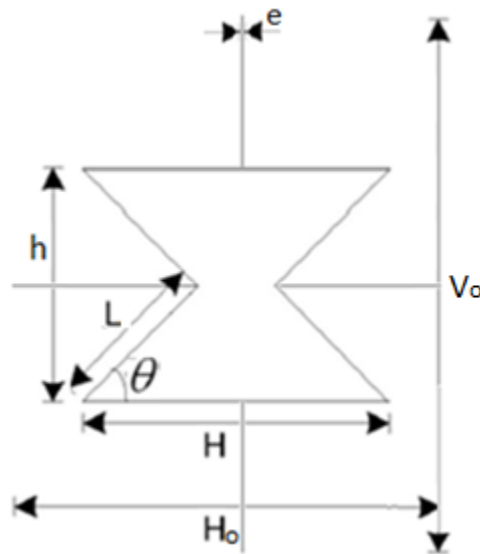


Figura 3.2 Parámetros de diseño para estructura auxética reentrante.

Para la realización de este proyecto se han realizado varias hipótesis. En primer lugar, se supone se supone que la estructura será totalmente simétrica, dando como resultado que cualquier punto de la estructura tenga su correspondiente equivalente.

Otra consideración es el tipo de material. Los materiales poliméricos son menos rígidos y están sujetos a más deflexión tras la carga o deformaciones [11]. Por lo tanto, se optó por la utilización de características propias del Aluminio, material con el que ya se fabrican actualmente paneles hexagonales tipo sándwich empleados principalmente en la construcción y como el que se habla en el capítulo 2.4.

### 3.4. MODELO ESTRUCTURAL CAD CON ABAQUS 6.13

Antes de comenzar de lleno con la descripción del proceso que se ha llevado en Abaqus para conseguir el diseño final, se debe mencionar que Abaqus trabaja con una serie de módulos en los que el usuario irá introduciendo paso a paso todos los datos necesarios, tales como geometría, material o condiciones de contorno...etc. que darán forma al diseño global.

Este estudio no se centra en la explicación modulo a modulo que conforma la solución final del proyecto. Sin embargo, debido a que se pretende el completo entendimiento del diseño y sus correspondientes resultados, la información básica y esencial si se menciona.

#### 3.4.1. GEOMETRÍA

Como ya hemos visto en capítulos anteriores, este estudio se centra en el comportamiento de la estructura vista en la Figura 3.2 frente a esfuerzos a tracción y a

compresión impuestos en los extremos verticales, tanto superior como inferior, de la estructura reentrante, variando el ángulo de reentrada  $\theta$  y el espesor de la propia estructura.

Para llevar a cabo dicho estudio, se han realizado diversos diseños creados por extrusión que varían el ángulo de reentrada desde  $25^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$  como el que se muestra en la Figura 3.3, el cual se trata de un ejemplo básico de la propia estructura de estudio con ángulo orientativo de  $45^\circ$ . Esta franja de posibles soluciones ubicada entre valores de  $0^\circ < \theta < 25^\circ$  y  $75^\circ < \theta \leq 90^\circ$  se ha preferido suprimir debido a su dificultad a la hora de la misma producción industrial y a su geometría brusca con prácticamente nulo recorrido sobre el que contraer o traccionar antes de la ruptura. En adición, se comprobará más adelante que este abanico de resultados provenientes de los ángulos de reentrada suprimidos no muestra ningún tipo de interés en cuanto a propiedades auxéticas se refiere.

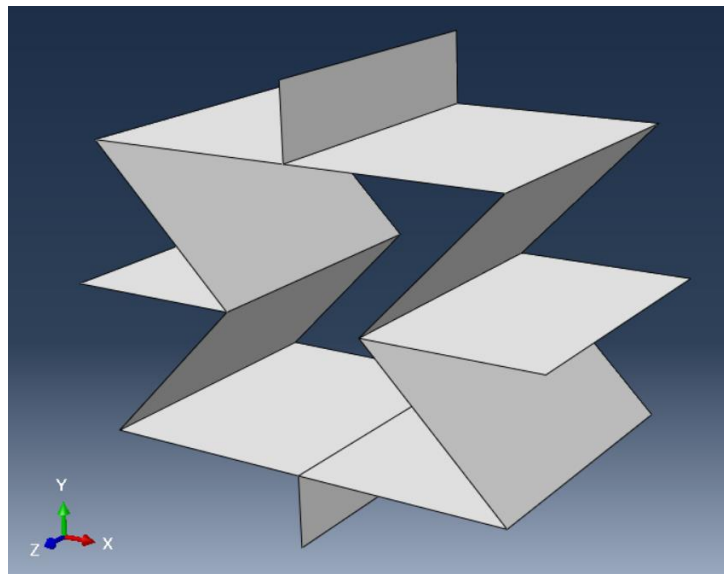


Figura 3.3 Geometría estructura auxética en Abaqus.

### 3.4.2. PROPIEDADES Y SECCIONES

Otro de los requerimientos indispensables del programa es la introducción de las propiedades del material con el que se va a trabajar, en este caso correspondientes al aluminio.

Para la función lineal entre la tensión y deformación del régimen elástico se conoce la densidad de  $2698 \text{ kg/m}^3$ , módulo de Young de  $70 \text{ GPa}$  y coeficiente de Poisson  $0,3$ .

En cuanto al régimen plástico, además de las propiedades anteriormente mencionadas, se emplea una curva plástica de endurecimiento *Jonhson-Cook* como la que se observa a continuación:

$$\sigma_y = (A + B \cdot \epsilon_p^n) \cdot \left(1 + C \cdot \text{Log} \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m\right)$$

Sin embargo, para la realización de este proyecto no se tiene en cuenta la sensibilidad a la velocidad de deformación ni los procesos térmicos en el material, dando como resultado una curva de operación como la siguiente ecuación:

$$\sigma_y = (A + B \cdot \varepsilon_p^n)$$

Donde:

- $A = 200 \text{ MPa}$
- $B = 144 \text{ MPa}$
- $n = 0.62$
- $\varepsilon_p$  es la deformación plástica equivalente.
- $\sigma_y$  es la tensión plástica equivalente.

Con el fin de un mayor entendimiento del comportamiento auxético en esta estructura reentrante, se van a realizar dos estudios independientes dentro del mismo proyecto. En uno de ellos se va a analizar la estructura siguiendo un modelo únicamente elástico y en el otro se va a emplear un comportamiento elasto-plástico.

En cuanto al valor del espesor de la estructura, éste es 0,2mm para todos aquellos diseños estudiados con diferentes ángulos de reentrada. No obstante, una vez se conozca el ángulo de reentrada con mejores respuestas auxéticas a tracción y compresión, se estudiará el efecto de la variación de dicho espesor para esa configuración, viendo así si el aumento o descenso en el espesor mejora o empeora las propiedades auxéticas.

### 3.4.3. CONDICIONES DE CONTORNO E IMPOSICIONES

Para realizar un correcto uso del programa, no haya errores a la hora de compilar y el programa se ejecute correctamente es indispensable conocer las condiciones de contorno a las que va a ser sometida la estructura. El objetivo de éstas es anclar la estructura a un punto fijo, impidiendo así que la estructura se pueda mover de forma libre una vez se le hayan aplicado las imposiciones o desplazamientos, a la vez que permitiendo la reacción o comportamiento de dicha estructura bajo efectos a tracción o compresión.

La primera de las condiciones de contorno se presenta en la Figura 3.4, donde a las 2 líneas marcadas en rojo (uniones entre “aletas” verticales y la estructura auxética) tienen impedido el movimiento en sentido del eje X.

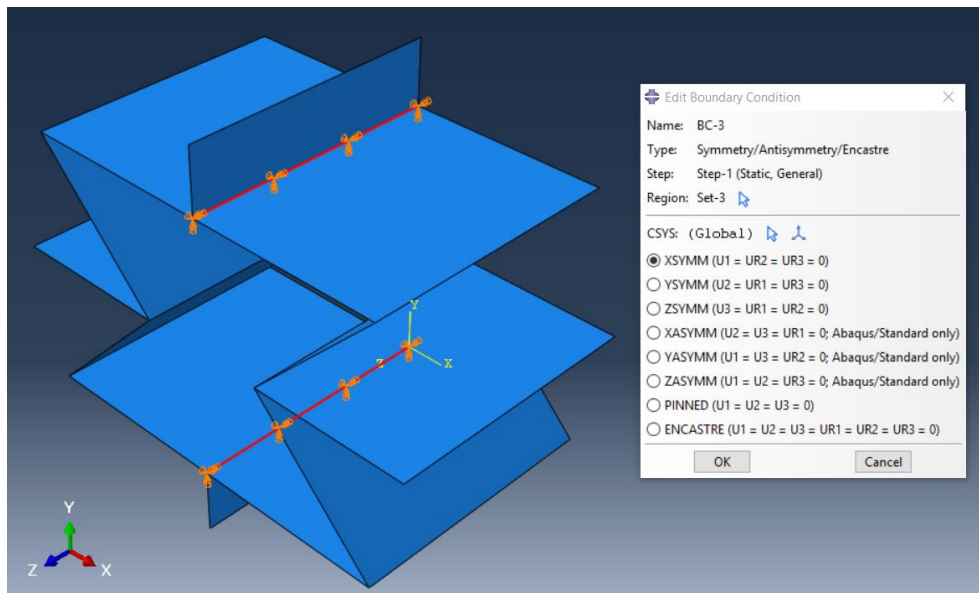


Figura 3.4 Condición de contorno I: set vertical-imposición movimiento en eje X.

La segunda de las condiciones de contorno se presenta en la Figura 3.5, donde los únicos 2 puntos marcados en rojo (punto de unión frontal entre “aletas” verticales y la estructura auxética) tienen impedido el movimiento en sentido del eje Z.

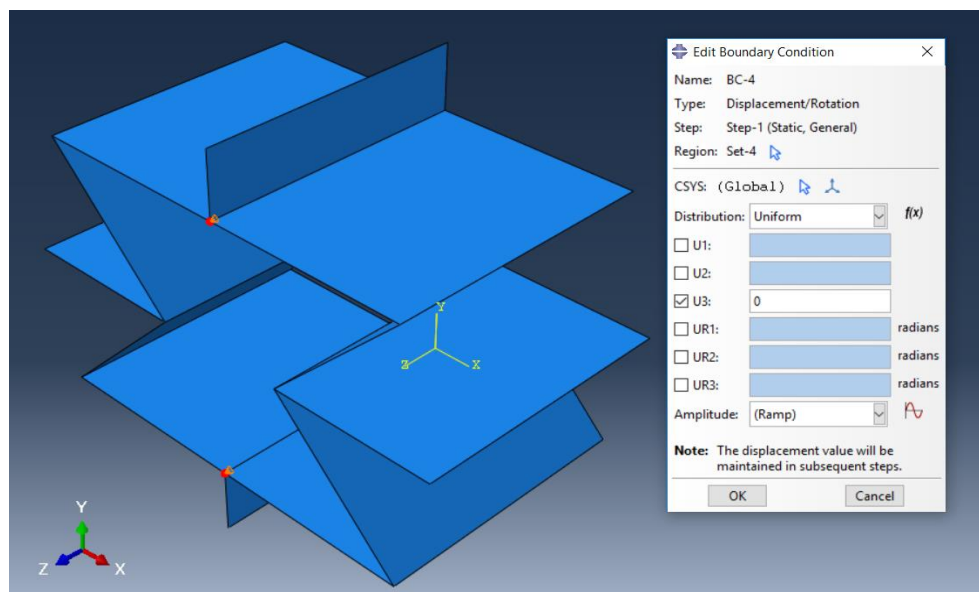


Figura 3.5 Condición de contorno II: puntos frontales de unión-imposición movimiento en eje Z.

Una vez se sabe que la estructura está fija en el espacio, llega la hora de imponer los desplazamientos. Se debe mencionar que este proyecto no está sometido a ningún tipo de carga, presiones o fuerzas, sino que una tercera condición de contorno es la encargada de sustituirlas, ofreciendo la misma respuesta de la estructura, con la diferencia que los resultados están ligados a desplazamientos o incrementos de longitud sin necesidad de realizar ningún tipo de cálculo de conversión de por medio.

En la Figura 3.6 se aprecia de una manera más clara las intenciones de esta imposición, donde flechas naranjas de la imagen muestran el sentido del desplazamiento impuesto sobre cada uno de los extremos verticales.

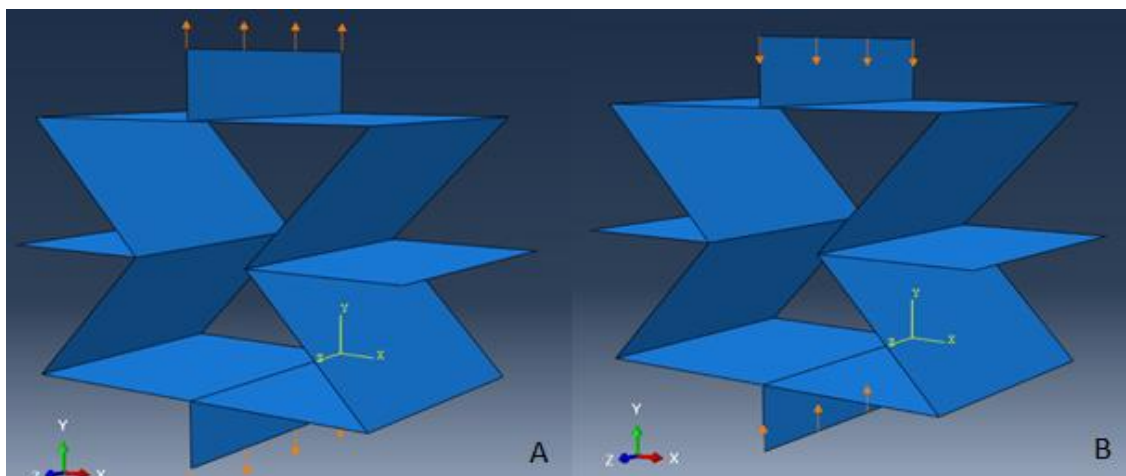


Figura 3.6 Condición de contorno III: set vertical sometido a desplazamientos tractores (A) y compresivos (B) en dirección del eje Y.

Lo que se pretende conseguir con estos desplazamientos verticales es estudiar el efecto horizontal de los extremos horizontales pues, si bien se recuerda, la definición del coeficiente de Poisson, además de ser el objeto de estudio, no es otra que la negativa del cociente de la deformación transversal a la fuerza entre la deformación longitudinal o, aplicado directamente al caso presente, la negativa del cociente de la deformación horizontal entre la deformación vertical.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}} = -\frac{\varepsilon_{horizontal}}{\varepsilon_{vertical}} = -\frac{\frac{\Delta H}{H_0}}{\frac{\Delta V}{V_0}}$$

En función del sentido de desplazamiento vertical que se imponga se van a obtener respuestas que comprimirán o traccionarán la estructura. En este proyecto se van a realizar ambos análisis, uno con desplazamientos a tracción y otro con desplazamientos a compresión.

#### 3.4.4. MALLADO Y VISUALIZACIÓN

Una vez conocidos los datos básicos necesarios y condiciones de contorno y éstos han sido introducidos a su vez en el programa, se puede proceder al análisis del modelo. Para ello el primer paso es mallar la estructura, dando como resultado un número total de 3040 elementos y 3192 nodos como se observa en la Figura 3.7.



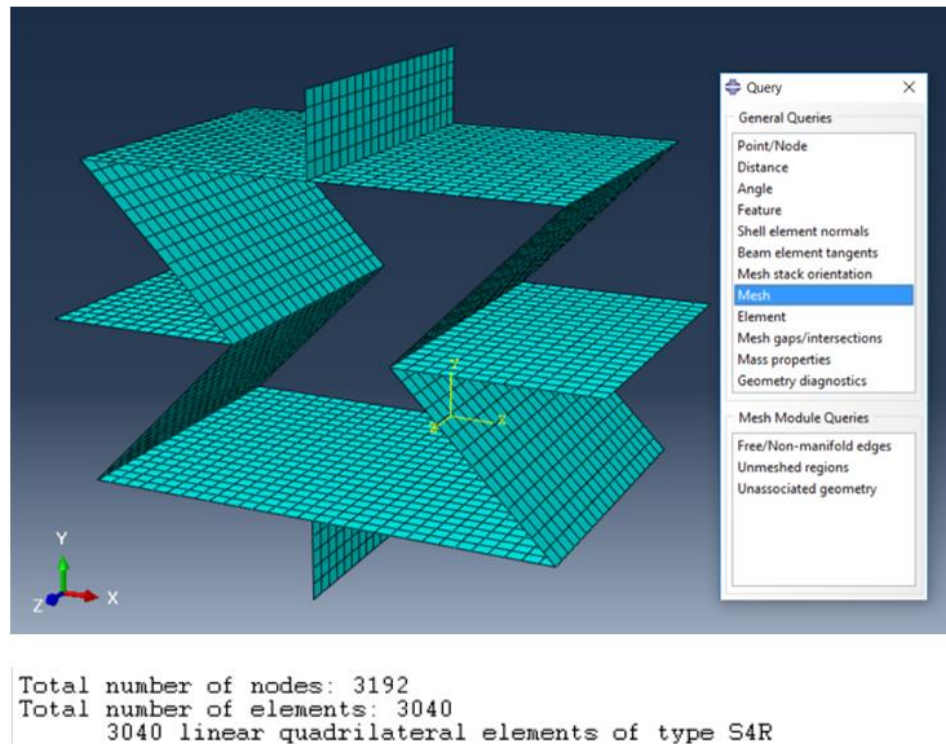


Figura 3.7 Mallado de estructura auxética reentrante.

Para finalizar este capítulo, en la Figura 3.8 se visualizan unos ejemplos de como sería la estructura deformada tras los efectos de desplazamientos verticales, generando en la misma efectos de tracción o compresión, en dirección del eje Y. Además, se muestran con color rojo las zonas donde las tensiones son mayores.

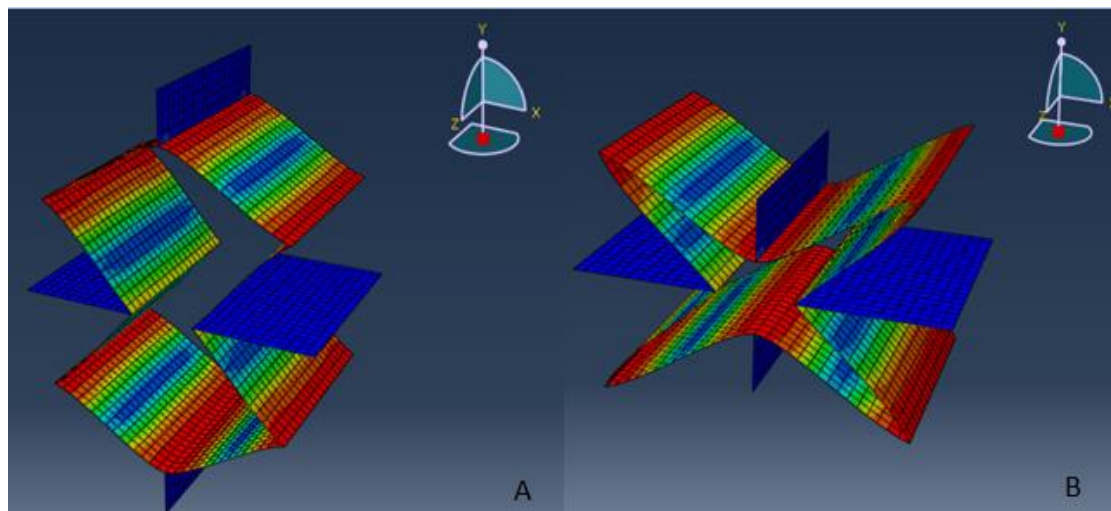


Figura 3.8 Estructura auxética reentrante deformada tras desplazamientos tractores (A) y compresivos (B) en dirección del eje Y.



# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS

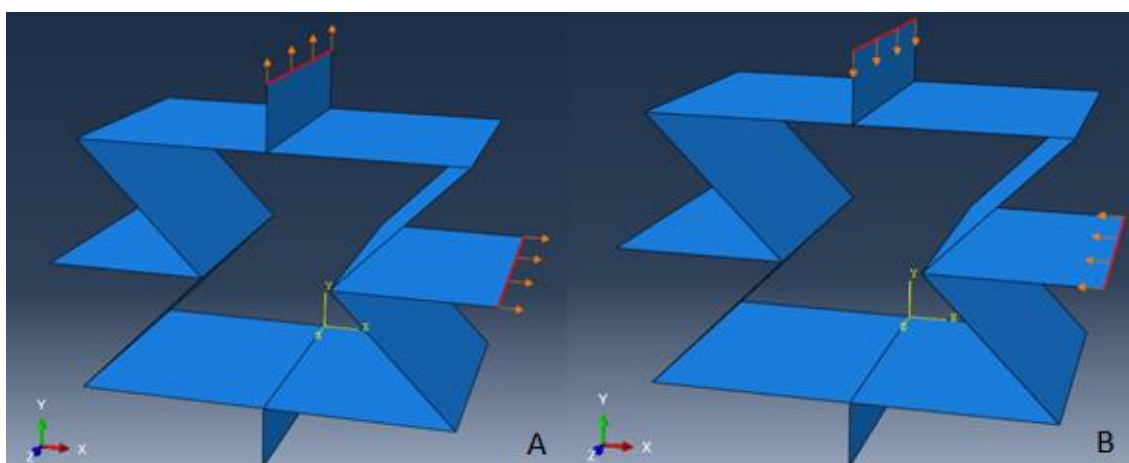
- 4.1. Método de cálculo.
- 4.2. Efectos a tracción.
- 4.3. Efectos a Compresión.
- 4.4. Efecto de la variación de espesor.

## 4.1. MÉTODO DE CÁLCULO

Finalizado el diseño estructural CAD es fundamental analizar los resultados obtenidos. Esto es lo que se pretende hacer en este capítulo.

Abaqus tiene la opción de reportar o extraer la información que se le pida como, por ejemplo: evolución de las tensiones en un elemento, deformaciones en cualquier eje, desplazamientos en cualquier eje, energía liberada en deformación... etc. en este caso se ha estudiado el desplazamiento del extremo horizontal a medida que se tracciona o contrae verticalmente la estructura.

En la Figura 4.1 se aprecia de una manera más clara a que se refiere con estudio del desplazamiento.



*Figura 4.1 Sentido de desplazamiento de “aletas” horizontales tras desplazamientos tractores (A) y compresivos (B) en dirección del eje Y.*

Gracias a que Abaqus permite exportar las gráficas XY a excel, la continuación del estudio se ha facilitado en gran medida.

A continuación se presenta un ejemplo base de como funciona el proceso de cálculo de datos, en concreto del diseño con ángulo de reentrada de 25° en régimen elástico para la obtención del coeficiente de Poisson en cada punto del proceso hasta llegar a un alargamiento vertical de 1mm del extremo vertical superior. A demás se introduce el término “deformación macroscópica”.

0,5ΔX (mm)	0,5ΔY (mm)	Def. macroscópica lateral	Coef. Poisson
0	0	0	0
7,74E-04	2,00E-02	0,001	-2,21E-02
1,52E-03	4,00E-02	0,002	-2,18E-02
2,25E-03	6,00E-02	0,003	-2,14E-02
2,95E-03	8,00E-02	0,004	-2,11E-02
3,62E-03	1,00E-01	0,005	-2,07E-02

4,27E-03	1,20E-01	0,006	-2,04E-02
4,90E-03	1,40E-01	0,007	-2,00E-02
5,50E-03	1,60E-01	0,008	-1,97E-02
6,08E-03	1,80E-01	0,009	-1,93E-02
6,63E-03	2,00E-01	0,01	-1,90E-02
7,16E-03	2,20E-01	0,011	-1,86E-02
7,67E-03	2,40E-01	0,012	-1,83E-02
8,15E-03	2,60E-01	0,013	-1,79E-02
8,60E-03	2,80E-01	0,014	-1,76E-02
9,04E-03	3,00E-01	0,015	-1,72E-02
9,44E-03	3,20E-01	0,016	-1,69E-02
9,83E-03	3,40E-01	0,017	-1,65E-02
1,02E-02	3,60E-01	0,018	-1,62E-02
1,05E-02	3,80E-01	0,019	-1,58E-02
1,08E-02	4,00E-01	0,02	-1,55E-02
1,11E-02	4,20E-01	0,021	-1,51E-02
1,14E-02	4,40E-01	0,022	-1,48E-02
1,16E-02	4,60E-01	0,023	-1,44E-02
1,18E-02	4,80E-01	0,024	-1,41E-02
1,20E-02	5,00E-01	0,025	-1,38E-02
1,22E-02	5,20E-01	0,026	-1,34E-02
1,23E-02	5,40E-01	0,027	-1,31E-02
1,25E-02	5,60E-01	0,028	-1,27E-02
1,26E-02	5,80E-01	0,029	-1,24E-02
1,26E-02	6,00E-01	0,03	-1,20E-02
1,27E-02	6,20E-01	0,031	-1,17E-02
1,27E-02	6,40E-01	0,032	-1,14E-02
1,27E-02	6,60E-01	0,033	-1,10E-02
1,27E-02	6,80E-01	0,034	-1,07E-02
1,27E-02	7,00E-01	0,035	-1,03E-02
1,26E-02	7,20E-01	0,036	-1,00E-02
1,25E-02	7,40E-01	0,037	-9,66E-03
1,24E-02	7,60E-01	0,038	-9,32E-03
1,23E-02	7,80E-01	0,039	-8,98E-03
1,21E-02	8,00E-01	0,04	-8,64E-03
1,19E-02	8,20E-01	0,041	-8,31E-03
1,17E-02	8,40E-01	0,042	-7,97E-03
1,15E-02	8,60E-01	0,043	-7,63E-03
1,12E-02	8,80E-01	0,044	-7,30E-03
1,10E-02	9,00E-01	0,045	-6,96E-03
1,07E-02	9,20E-01	0,046	-6,62E-03
1,03E-02	9,40E-01	0,047	-6,29E-03
1,00E-02	9,60E-01	0,048	-5,95E-03
9,64E-03	9,80E-01	0,049	-5,62E-03
9,25E-03	1	0,05	-5,29E-03

Tabla 1. Ejemplo: Cálculo de coef. Poisson y deformación macroscópica en estructura con ángulo de reentrada 25° y régimen elástico.

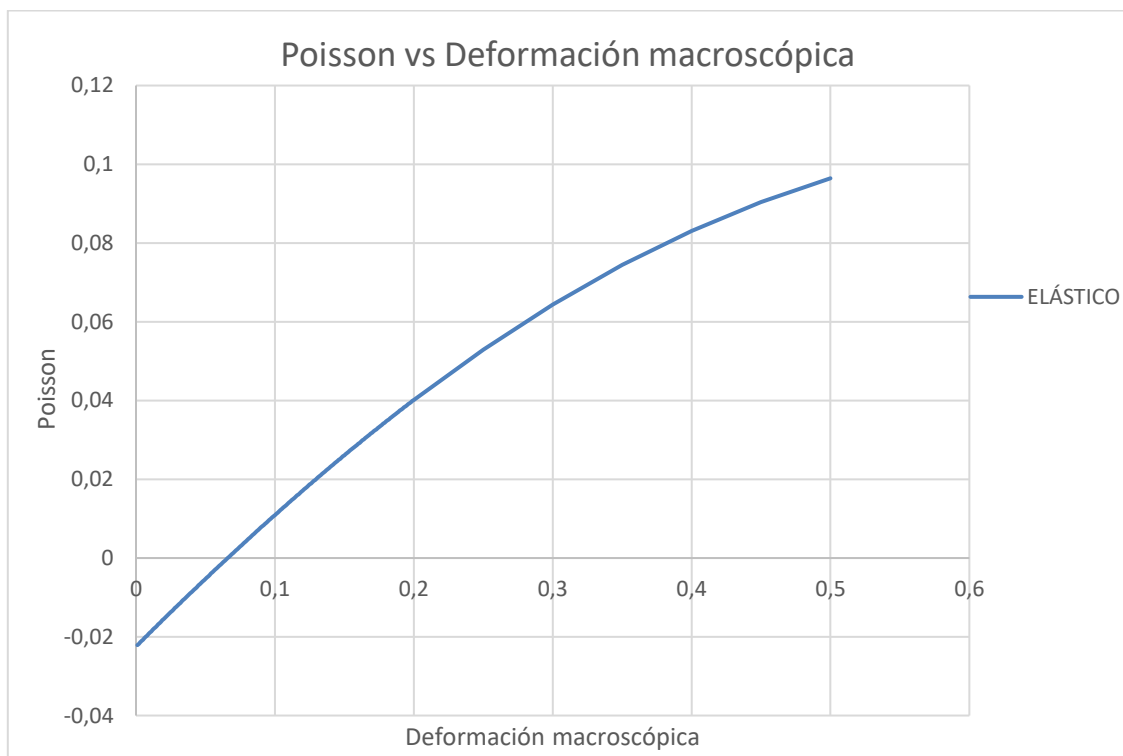
## Capítulo V. Resultados

Donde:

- Coeficiente de Poisson =  $-\frac{\frac{2 \cdot 0.5 \Delta X}{H_0}}{\frac{2 \cdot 0.5 \Delta Y}{V_0}}$
- Deformación macroscópica =  $0.5 \Delta Y / V_0$
- $H_0$  tiene un valor de 35mm y  $V_0$  un valor de 20mm.

Cabe destacar en este punto el término de “deformación macroscópica”, pues éste hace referencia a la deformación de la mitad superior de la estructura, pues se trata del cociente del incremento vertical de una mitad superior entre la longitud vertical inicial  $V_0$ .

En la Tabla 1 solo se muestran resultados correspondientes al desplazamiento superior de 1mm. Sin embargo, el resultado de la evolución del desplazamiento vertical superior hasta 10mm a tracción se muestra en la Figura 4.2.



*Figura 4.2 Ejemplo: Poisson vs deformación macroscópica a tracción para estructura auxética reentrante con ángulo de reentrada de 25° en régimen elástico.*

Lo que se pretende con éste ejemplo es ayudar al entendimiento del origen de los resultados posteriores y definir el término “deformación macroscópica”, pues éste se repite hasta el final del capítulo.

Este ejemplo y sus correspondientes resultados son válidos para una estructura diseñada en un régimen totalmente elástico. En la vida real esto no sucede, sino que llega un punto en el que el material sobrepasa su límite elástico y comienza a plastificar, dando como resultado una deformación permanente en la estructura. No obstante, conocer como sería el

comportamiento totalmente elástico ayuda a entender mejor el comportamiento de la estructura auxética.

Como ya se ha dicho, este ejemplo dista de la realidad debido a su ausencia de régimen plástico. Sin embargo, gracias a *Abaqus* podemos introducir materiales con propiedades similares o iguales a las reales, solamente hay que introducir el régimen plástico en el módulo *property* con las características mencionadas en el punto 3.4.2.

Repitiendo el mismo procedimiento de cálculo visto con las nuevas propiedades plásticas del material (anteriormente inexistentes), se puede observar una gran diferencia entre ambos materiales. En la Figura 4.3 se representa la gráfica de los dos materiales conjuntos.

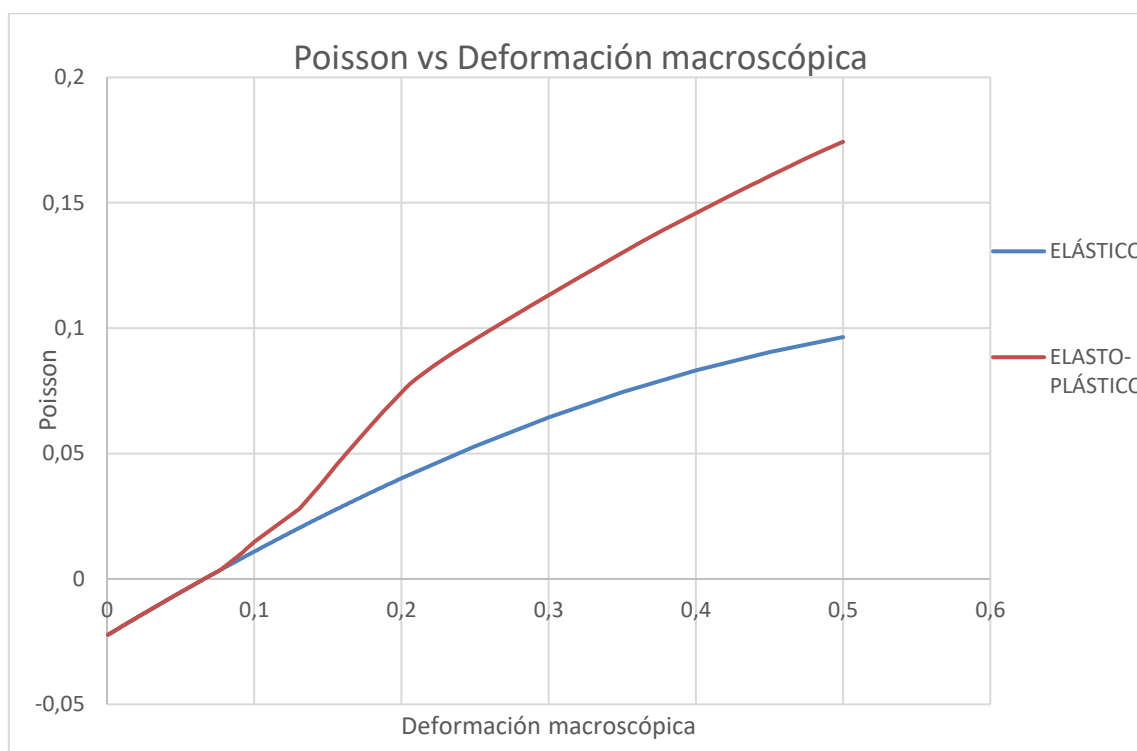


Figura 4.3 Ejemplo: Poisson vs deformación macroscópica a tracción para estructura auxética reentrante con ángulo de reentrada de 25°.

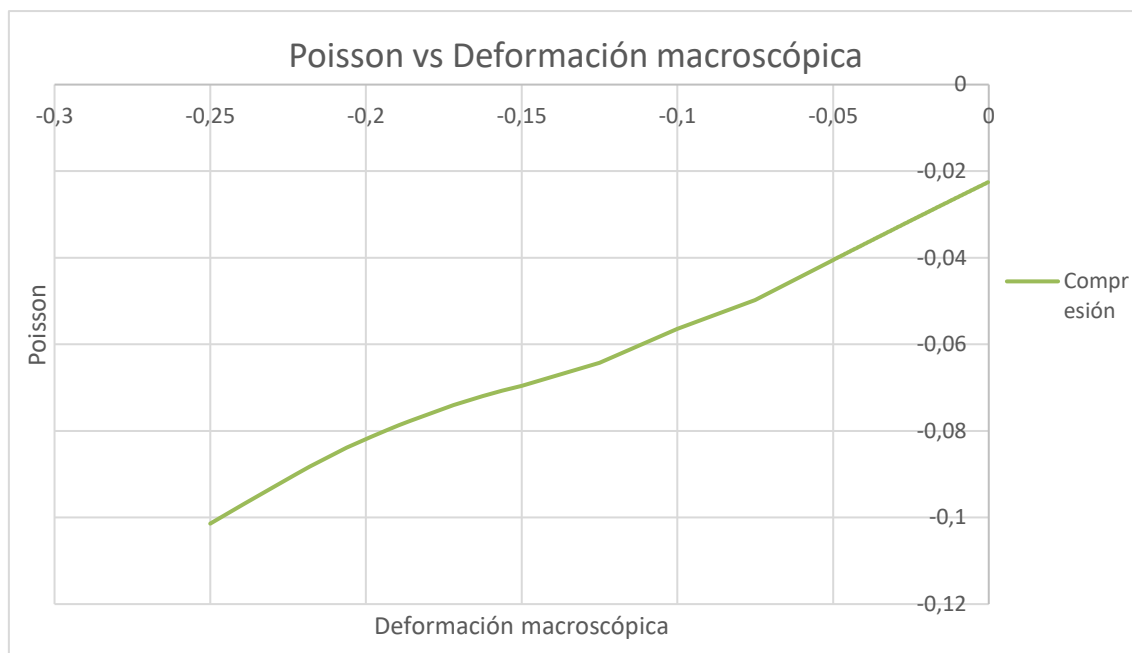
Como se puede observar, hay un pequeño tramo donde ambas curvas coinciden. Este tramo compartido simboliza el régimen elástico “real” del material, pues el punto correspondiente a una deformación macroscópica de  $0,085 \equiv 8,50\%$ , punto tras el cual las curvas se separan, marca el final del régimen elástico y el comienzo del régimen plástico.

La Figura 4.3 presenta una peculiaridad, y ésta es que las curvas parten de un punto ubicado en la franja donde el coeficiente de Poisson es negativo y ascienden hasta valores positivos. Puede parecer un error de diseño, pero no lo es. Lo que esto significa es que la estructura reentrante de aluminio presenta, básicamente, características auxéticas a tracción en su región elástica.

Hasta ahora, el método de cálculo ha sido aplicado para casos donde el desplazamiento vertical origina respuestas de tracción en la estructura (Figura 4.1.A), por lo que para

completar este proyecto también es necesario estudiar que pasaría cuando los desplazamientos tienen un sentido contrario y se generan respuestas compresivas en la estructura (Figura 4.1.B). Llegado a este punto, solo hay que repetir el proceso de cálculo con un tercer, y último, diseño CAD, donde con la condición de contorno III, encargada de los desplazamientos, sea compresiva (ver Figura 3.6.B).

Los resultados del ejemplo a compresión se muestran en la Figura 4.4.



*Figura 4.4 Ejemplo: Poisson vs deformación macroscópica a compresión para estructura auxética reentrante con ángulo de reentrada de 25°.*

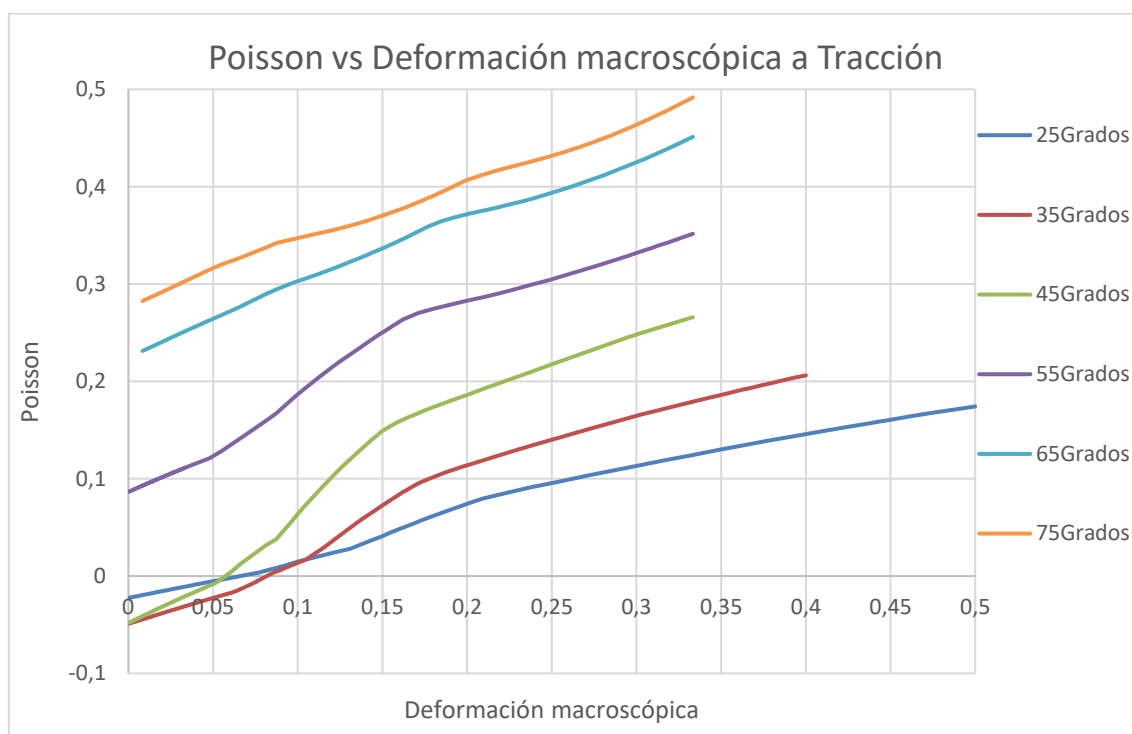
Como se puede observar, la respuesta de la estructura reentrante dista mucho ya sea un caso de desplazamientos a tracción o a compresión pues, como se muestra en la Figura 4.4, dicha estructura presenta características auxéticas (el coeficiente de Poisson es negativo) en todo momento siempre trabaje a compresión.

## 4.2. RESPUESTAS FRENTE A DESPLAZAMIENTOS TRACTORES

En este subcapítulo se trata el método de cálculo que se ha visto en el punto 4.1 a rasgos globales. Una vez conocido el proceso de obtención de datos y análisis de resultados se procede a estudiar todos los diseños en el rango establecido en el punto 3.4.1 donde, a modo de recordatorio, se plantea el estudio de la estructura auxética reentrante para ángulos de reentrada con valores de  $25^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ .

Ya se conoce el efecto de desplazamientos verticales en una estructura auxética reentrante con ángulo de reentrada igual a 25°. A continuación, de forma ilustrada en la Figura 4.5, se muestra la respuesta del coeficiente de Poisson frente a la deformación macroscópica a tracción para el rango desde 25° a 75° gracias al estudio de seis diseños diferentes en los que

ángulo de reentrada varía de  $10^\circ$  en  $10^\circ$ . En cada uno de estos diseños se sigue el método de cálculo del punto 4.1.



*Figura 4.5 Poisson vs deformación macroscópica global a tracción para estructura auxética reentrante.*

Como se aprecia en la Figura 4.5, las estructuras reentrantes con ángulos mayores a  $45^\circ$  no presentan efectos auxéticos a tracción en ningún punto de la deformación, ni siquiera en su correspondiente régimen elástico.

Este proyecto se centra en estructuras que presenten características auxéticas por lo que serán aquellas con algún tramo con coeficiente de Poisson negativo en las que se centre el estudio.

Para poder decidir cual es la mejor configuración (ángulo reentrante que proporcione mejores propiedades auxéticas), se decide realizar una ampliación, ver Figura 4.6, de la franja donde se concentran aquellos ángulos con presencia de valores negativos del coeficiente de Poisson.

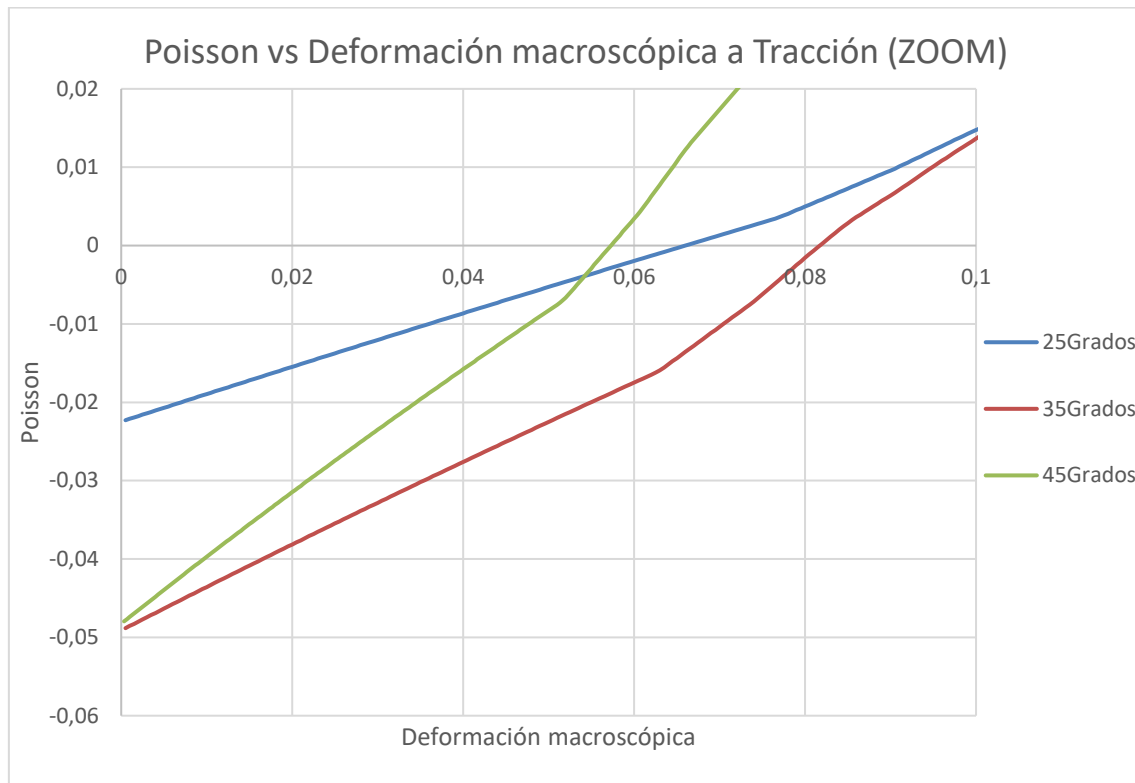


Figura 4.6 Poisson vs deformación macroscópica global a tracción para estructura auxética reentrante. Zoom región coeficiente de Poisson negativo.

Vista la Figura 4.6, región del coeficiente de Poisson negativo, se llega a la conclusión de que la configuración con el ángulo de reentrada de 35° es la más eficiente y con mejores propiedades auxéticas, pues se trata de la configuración con mayor área bajo la curva de Poisson frente a deformación macroscópica.

#### 4.3. RESPUESTAS FRENTE A DESPLAZAMIENTOS COMPRESIVOS

Conocida la respuesta de la estructura auxética reentrante de aluminio sometida a desplazamientos tractores solo queda conocer los resultados de los ensayos a desplazamientos compresivos.

En la Figura 4.7 se muestra la variación del coeficiente de Poisson frente a la deformación macroscópica a compresión desde configuraciones de 25° a 75° gracias al estudio de seis diseños diferentes en los que ángulo de reentrada varía de 10° en 10°.



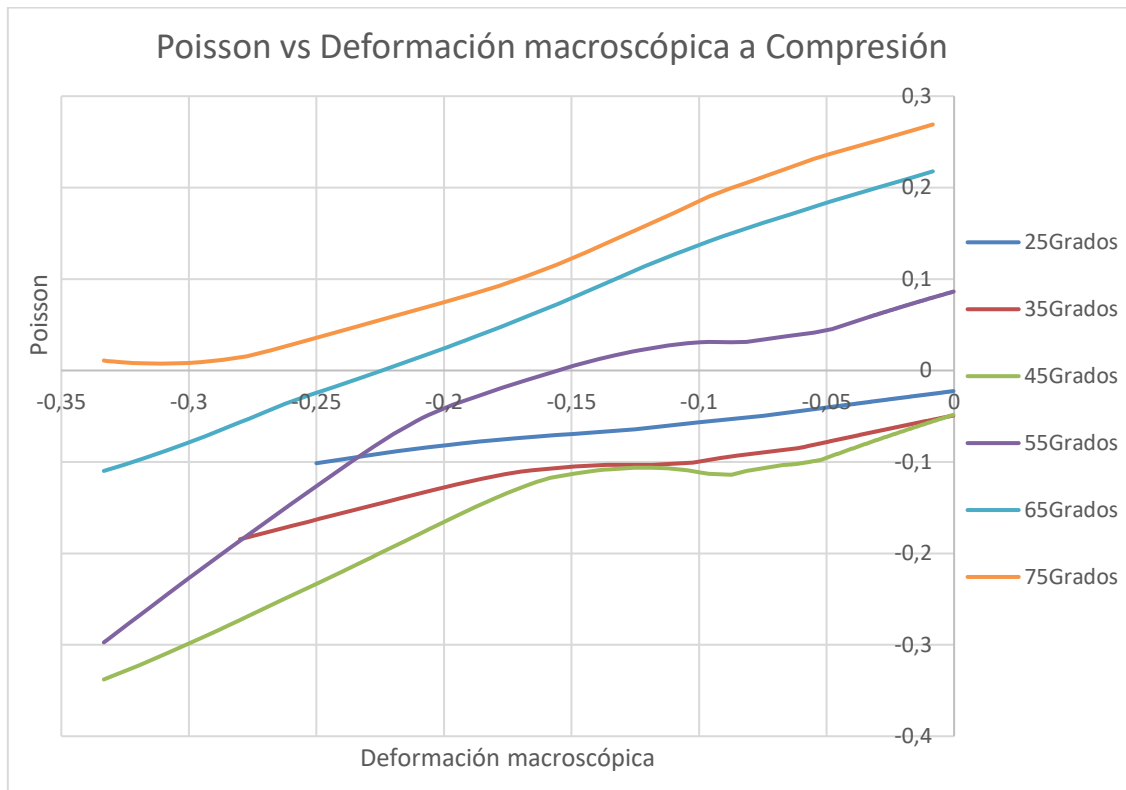


Figura 4.7 Poisson vs deformación macroscópica global a compresión para estructura auxética reentrante.

Como se observa en la Figura 4.7, las estructuras reentrantes con ángulos de reentrada menores a 45° presentan efectos auxéticos en todos los puntos del proceso de deformación. Sin embargo, una vez el ángulo es mayor a 45° la estructura precisa de una gran deformación macroscópica antes de entrar en el régimen donde el coeficiente de Poisson es negativo, y por tanto exhibir propiedades auxéticas. De hecho, la configuración con ángulo de reentrada igual a 75° no llega a presentar tales propiedades en ninguno de sus puntos.

Como se menciona en el punto 4.2, este proyecto se centra en estructuras que muestren las mejores características auxéticas. En este caso se obtienen mejores respuestas auxéticas que en los ensayos con desplazamientos a tracción, pues hay varias configuraciones que se encuentran durante todo el proceso bajo respuestas auxéticas. Concretamente se trata de los ángulos de reentrada valorados en 35° y 45° los que mejores respuestas presentan, actuando éstos de forma similar durante todo el proceso de deformación.

#### 4.4. RESPUESTAS FRENTE A VARIACIONES DE ESPESOR

En este apartado se ensaya el efecto de la variación de espesor  $e$  (ver Figura 3.2) en la estructura. Para ello se decide realizar el estudio del coeficiente de Poisson más en detalle sobre la celda auxética reentrante con un ángulo de reentrada de 35° debido a que es ésta la que mayor área bajo la curva posee en la grafica global de Poisson frente a deformación macroscópica a tracción y también, junto al ángulo de 45°, a compresión.

Llegada a la conclusión de que es el ángulo de  $35^\circ$  la mejor configuración con mejores propiedades auxéticas se procede al estudio de dos nuevos diseños en los que se ha hecho una variación de espesor. A estos nuevos espesores se les ha nombrado de la siguiente manera:  $e_1$  tiene un valor de 0,1 mm (la mitad del original),  $e_2$  presenta el valor general del proyecto 0,2 mm y  $e_3$  con un valor de 0,4 mm (el doble del original).

En la Figura 4.8 se muestra el efecto de la variación de espesor en la curva de Poisson frente a deformación macroscópica en una estructura reentrante con ángulo de reentrada igual a  $35^\circ$  sometida a desplazamientos verticales tractores.

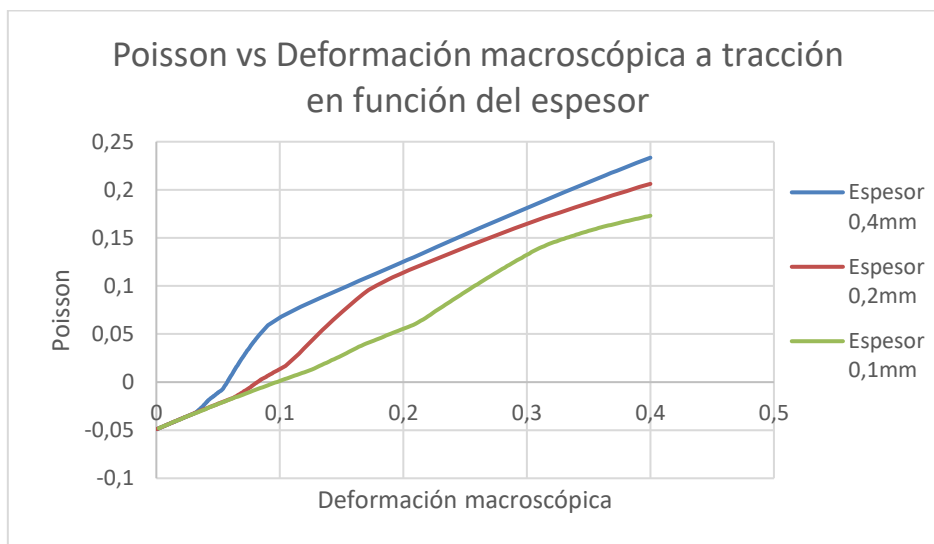


Figura 4.8 Poisson vs deformación macroscópica a tracción para estructura auxética reentrante con  $\theta = 35^\circ$  sometida a variaciones de espesor.

En la Figura 4.9 se muestra el efecto de la variación de espesor en la curva de Poisson frente a deformación macroscópica en una estructura reentrante con ángulo de reentrada igual a  $35^\circ$  sometida a desplazamientos verticales compresivos.

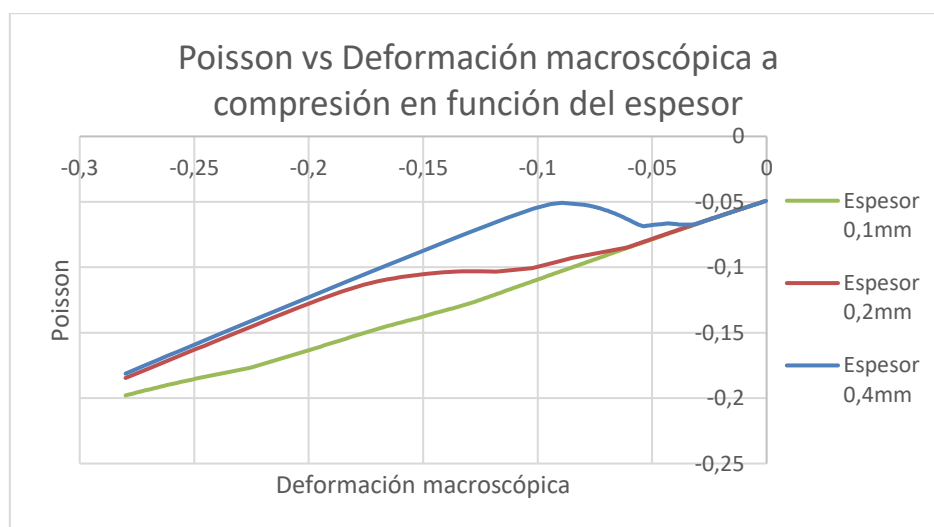
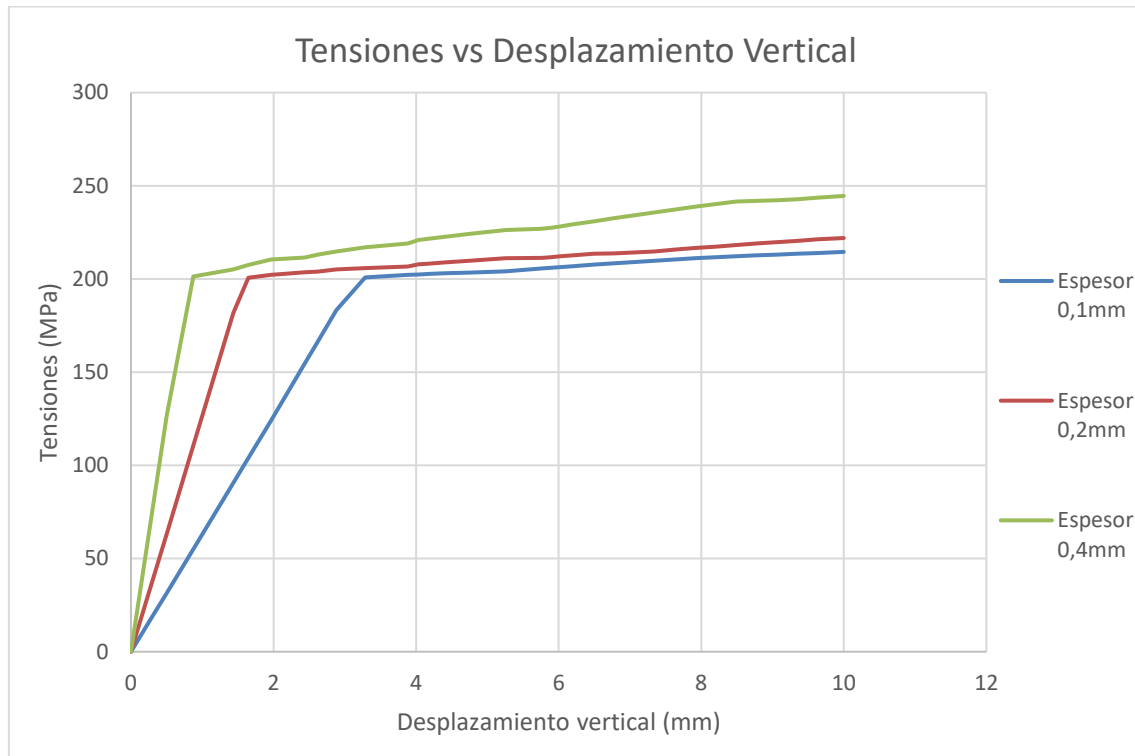


Figura 4.9 Poisson vs deformación macroscópica a compresión para estructura auxética reentrante con  $\theta = 35^\circ$  sometida a variaciones de espesor.

Vistas las Figuras 4.8 y 4.9 se llega a la conclusión de que cuanto menor sea el esperor mejores propiedades auxéticas presentará la estructura. Esto se debe a que la curva de Poisson frente a deformación macroscópica tiende hacia una función más lineal y, por tanto, con mayor área negativa (región donde el coeficiente de Poisson es negativo) bajo su curva.

Para finalizar el capítulo, se decide comprobar las tensiones máximas de la estructura para cada uno de los distintos espesores anteriormente mencionados. Los resultados son asombrosos, pues como se puede observar en la Figura 4.10 es aquella estructura con menor espesor la última en alcanzar el límite elástico.



*Figura 4.10 Tensiones vs desplazamiento vertical para estructura auxética reentrante con  $\theta = 35^\circ$  sometida a variaciones de espesor.*

## CONCLUSIONES

En este proyecto se ha descrito la investigación del efecto de los parámetros geométricos en una celda simple de estructura auxética reentrante cuando ésta es sometida a esfuerzos de compresión y tracción generados por el desplazamiento vertical de la estructura.

La resolución del presente estudio se ha hecho posible gracias al programa informático *Abaqus 6.13*, donde el modelo de elementos finitos es construido por extrusión utilizando el elemento tipo “Shell”.

Desde el punto de vista teórico, las estructuras auxéticas son aquellas que presentan relaciones de Poisson negativas. Sin embargo, como se ha visto a lo largo del proyecto, no solamente es necesario una forma estructural inicial auxética para presentar las características propias de las estructuras auxéticas, sino que las características geométricas y propiedades del material sean las adecuadas para generar este tipo de respuesta.

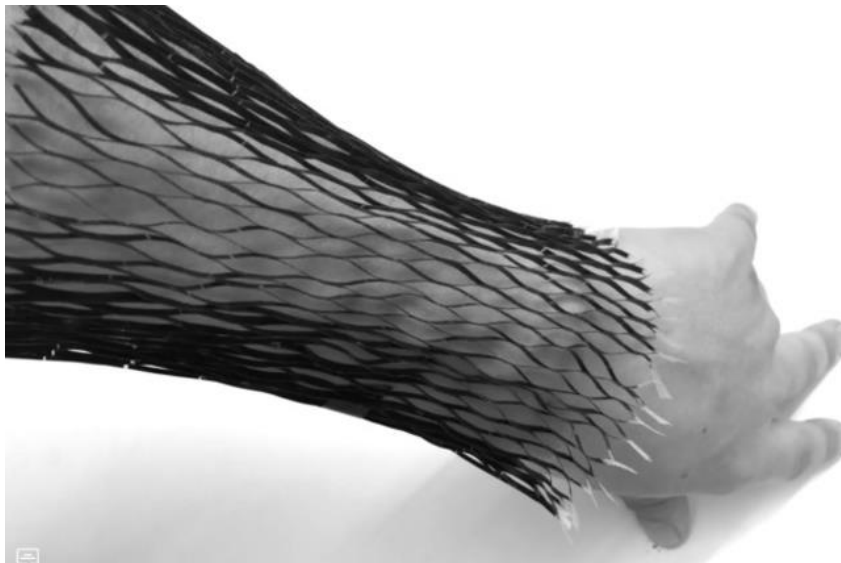
Como se puede comprobar en el capítulo de resultados, no siempre la solución más estética y “simple” como es la geometría con un ángulo de reentrada de  $45^\circ$  es la más eficaz, sino que se trata de los ángulos correspondientes valorados entre  $35^\circ$  y  $45^\circ$  los que mejores respuestas auxéticas presentan.

El estudio se centra en el ángulo de reentrada de  $35^\circ$  debido a que es el que presenta mejores respuestas auxéticas a tracción y a compresión. A demás, sobre éste se realizan variaciones de espesor para conocer por completo el efecto de cualquier tipo de variación geométrica en las propiedades auxéticas finales. El resultado de la variación de espesor indica que a medida que reducimos el espesor de dicha celda reentrante no solo mejoran las propiedades auxéticas, sino que también mejora la resistencia frente a tensiones de la estructura.

## TRABAJO FUTURO Y APLICACIONES

El reciente interés y desarrollo investigativo que se ha venido dando en los últimos años en lo respectivo a materiales y microestructuras auxéticas, se presenta como una base para la creación de técnicas de implementación de estos nuevos materiales de comportamiento no convencional que prevén un nuevo futuro en cuanto a la ingeniería de materiales.

Un grupo de investigadores del Self-Assembly Lab del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) han desarrollado el Heat-Active Auxetic Material (material auxético activado por calor), un material inteligente que actúa como los poros de la piel humana, expandiéndose o contrayéndose en respuesta a los cambios de temperatura ambiente. El material toma su nombre de su capacidad auxética, donde a diferencia de la mayoría de materiales comunes, que adelgazan cuando se estiran, el Heat-Active Auxetic Material es capaz de expandirse o contraerse en todas direcciones cuando se estira o se comprime. El material no requiere acción humana, éste responde a un estímulo de forma automática, da un paso más frente a los materiales auxéticos tradicionales, ofreciendo muchas más posibilidades de diseño y fabricación. Actualmente se estudia su aplicación al mundo de la moda, donde actuaría como una “segunda piel”, contrayéndose con el frío para conservar el calor, y dilatándose con las altas temperaturas para permitir el flujo de aire en su interior.

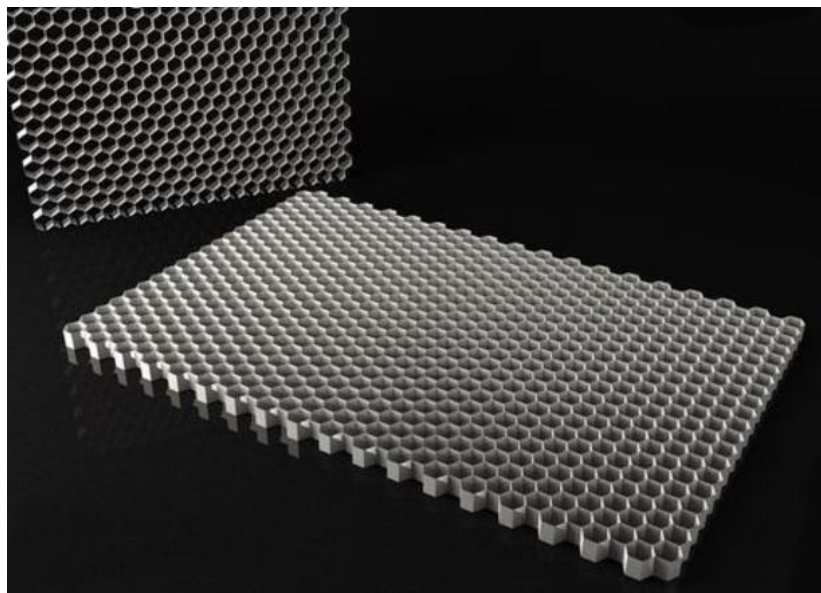


*Figura 5.1 Material auxético activado por calor. Experimento MIT.*

Los materiales auxéticos pintan un cuadro para el futuro no solo de las espumas, sino de cualquier otro material como metales, plásticos...etc. Frente a protecciones de caídas, materiales de embalaje, construcción, ropa, zapatos, armaduras, servicios médicos o cualquier otra de las diversas aplicaciones que implican el estiramiento y la compresión de los propios materiales. El objetivo de este tipo de estructuras es el de ser diseñados, como el experimento Heat-Active Auxetic Material, para transformarse de forma autónoma en función de la temperatura, la humedad o la luz, con propiedades únicas de estiramiento o compresión que son inauditas en los materiales tradicionales de hoy en día.

Debido a las características que presentan este tipo de estructuras, éstas han despertado un alto interés en el mundo de la biomedicina. Ejemplos que están siendo estudiados en la actualidad van desde la creación de prótesis arteriales que se expandan o contraigan en función del flujo sanguíneo, dilatadores para usos como la angioplastia (la cual consiste en dilatar una arteria o vena estrecha con el fin de restaurar el flujo sanguíneo, típicamente obstruido), vendajes inteligentes o prótesis corporales.

No obstante, no es necesario que estos materiales trabajen de forma automática o autónoma para que sean eficaces. En el mundo de la industria y construcción ya están presentes las láminas de diversos materiales como el aluminio, policarbonato, fibra de carbono...etc. En forma de panal como se muestra en la Figura B. Con estos panales ya se está comerciando de forma internacional debido a que las aplicaciones del nido de abeja de aluminio son múltiples y en sectores diferentes, desde la industria ferroviaria hasta la industria naval o como componente de máquinas, en la serigrafía...etc. Además, el nido de abeja se utiliza como núcleo para paneles tipo sándwich. Las aplicaciones son las siguientes: Suelos, techos, puertas, paredes divisorias, fachadas, encimeras para máquinas automáticas y para todos los productos que necesitan tener una excelente relación rigidez / peso.



*Figura 5.2 Nido de abeja de aluminio (honeycomb).*

En definitiva, el nido de abeja como núcleo de paneles sándwich es la mejor solución, si el producto final tiene que mostrar las características siguientes: Poco peso, rigidez, resistencia a la compresión, al corte y a la corrosión. Además, el nido de abeja sin chapas se puede utilizar como deflector que canaliza o proporciona la ventilación del aire en una única dirección.

## MARCO REGULADOR

En este punto se expone un marco regulador desde el punto de vista investigación científica I+D+i, tratando apartados de estándares técnicos, si son aplicables o no acorde a la tecnología desarrollada... etc.

Antes de empezar, debe ser sabido que las normas europeas se elaboran cuando existe una necesidad pública, industrial o de mercado importante. Por ejemplo, la industria puede necesitar una norma para asegurar la operatividad de un producto o servicio, el mercado puede utilizar una norma para asegurarse de que la competencia es leal, el público se puede beneficiar de una norma que mejore la calidad y seguridad de un producto. Además, las normas europeas también se elaboran para ayudar a las personas a cumplir la legislación europea en políticas como el mercado único. Muchas normas, de hecho, se elaboran por una combinación de razones y benefician a muchas partes

La Normalización es una actividad colectiva orientada a establecer solución a problemas repetitivos. Ésta tiene una influencia determinante, en el desarrollo industrial de un país, al potenciar las relaciones e intercambios tecnológicos con otros países.

Los objetivos de la normalización, pueden concretarse en tres:

- La economía, ya que a través de la simplificación se reducen costos.
- La utilidad, al permitir la intercambiabilidad.
- La calidad, ya que permite garantizar la constitución y características de un determinado producto

Las normas son una fuente de conocimiento para la investigación y el desarrollo ya que reflejan el estado de la tecnología y motivan la mejora continua. Las normas generan la terminología en nuevas áreas tecnológicas y fijan los referentes de calidad, seguridad y compatibilidad en un estado temprano de desarrollo. Además, promueven el desarrollo de nuevos campos tecnológicos: la creación de nuevos métodos de ensayo y medida generan proyectos de investigación y desarrollo y promueven la cooperación entre las entidades financiadoras y los institutos de investigación

Este proyecto, al centrarse por completo en la investigación de respuestas físicas en estructuras con las que actualmente no se está comercializando, no es posible definir normas concretas para la elaboración de dichas estructuras. Sin embargo, existen una serie de normas UNE que ayudan a elaborar proyectos de I+D+i, implantar un sistema de gestión de I+D+i o realizar de forma sistemática la observación y búsqueda de ideas que se transformen en nuevos productos o servicios. Las normas son las siguientes:

- EA 0043:2015 - Requisitos para la consideración como Joven Empresa Innovadora.
- EA 0047:2015 - Requisitos para la consideración como Pequeña o Mediana Empresa Innovadora.
- UNE 166000:2006 - Gestión de la I+D+i, Terminología y definiciones de las actividades de I+D+i.

- UNE 166001:2006 - Gestión de la I+D+i, Requisitos de un proyecto de I+D+i.
- UNE 166002:2014 - Gestión de la I+D+i, Requisitos del Sistema de Gestión de la I+D+i.
- UNE 166006:2011 - Gestión de la I+D+i, Sistema de vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva.
- UNE 166008:2012 - Gestión de la I+D+i, Transferencia de tecnología.
- UNE-CEN/TS 16555-1:2013 EX - Gestión de la innovación. Parte 1, Sistema de gestión de la innovación.
- UNE-CEN/TS 16555-2:2015 EX - Gestión de la innovación. Parte 2, Gestión de la inteligencia estratégica.
- UNE-CEN/TS 16555-3:2015 EX Vigente - Gestión de la innovación. Parte 3, Pensamiento innovador ("Innovation thinking").



## ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO

Para finalizar el proyecto, se pretende exponer un breve estudio del presupuesto asociado a la elaboración de este TFG. Los costes a tener en cuenta serán los asociados a la mano de obra, la adquisición de la licencia del programa informático *Abaqus 6.13* y los costes relativos asociados al material empleado. A todo esto habrá que añadirle el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA), que se tasa en un 21 %. El proyecto se ha realizado durante un periodo de 3.5 meses. Se han considerado 20 días laborables con una jornada laboral de 3 horas, lo que conlleva un total de 60 horas al mes y 210 horas de trabajo totales.

El único coste referente a la mano de obra es el sueldo correspondiente al elaborador del proyecto. En la Tabla 2 se observa el coste por mano de obra.

Categoría	Coste por hora (€/h)	Horas mensuales (h)	Horas totales (h)	Coste total (€)
Ingeniero	30	60	210	6.300

Tabla 2. Costes por mano de obra.

A pesar de que el software empleado para la realización de este estudio ha sido proporcionado por la universidad, con el fin de hacer un estudio de presupuesto lo más verosímil posible, dado que la versión de *Abaqus 6.13* no se trata de la versión de estudiante, se decide incluir el coste referente a la amortización correspondiente a los 3,5 meses de duración del proyecto. El coste referente a este periodo y esta licencia se aprecian en la Tabla 3.

Software	Coste total (€)
Abaqus 6.13	1.200

Tabla 3. Coste de licencias de software.

Por último, se tendrán en cuenta los costes asociados al material y hardware necesario para la realización desde el diseño de este proyecto hasta la impresión en papel del mismo. Estos costes se pueden observar en la Tabla 4.

Elemento	Coste total (€)
Impresiones y encuadernado	12
Ordenador Asus R510V	800

Tabla 4. Coste de material.

El coste total del proyecto se calcula como la suma de los costes parciales asociados a la mano de obra, a las licencias y al material. Una vez obtenida dicho sumatorio se le aplicará el IVA para obtener el presupuesto global del proyecto. En la Tabla 5 se muestra el coste parcial.

Concepto	Coste (€)
Mano de obra	6.300
Licencias de software	1.200
Material	812
<b>Total</b>	<b>8.312</b>

*Tabla 5. Costes parciales.*

Al coste parcial total solo hay que añadirle el impuesto de valor añadido para obtener el presupuesto global del proyecto. En la Tabla 6 se muestra el coste global de la realización del proyecto.

Concepto	Coste (€)
Coste parcial	8.312
IVA (21 %)	1.745,52
<b>TOTAL</b>	<b>10.057,52</b>

*Tabla 6. Costes totales.*

## REFERENCIAS

- [1] Scarpa, F., Yates, J., Ciffo, L. and Patsias, S. (2002), Dynamic crushing of auxetic open-cell polyurethane foam, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 216 (12): 1153-1156.
- [2] Scarpa, F., Cannas, A. and Yates, J. (2005), Static and high constant strain rate loading on auxetic and conventional PU foam, *Journal of Advanced Materials*, 37 (3): 11-14.
- [3] Scarpa, F., Ciffo, L. and Yates, J. (2004), Dynamic properties of high structural integrity auxetic open cell foam, *Smart Materials and Structures*, 13: 49.
- [4] Scarpa, F., Pastorino, P., Garelli, A., Patsias, S. and Ruzzene, M. (2005), Auxetic compliant flexible PU foams: static and dynamic properties, *Physica Status Solid (b)*, 242 (3): 681-694.
- [5] Prawoto, Y. (2012), Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio, *Computational Materials Science*, 58: 140-153
- [6] Wang, Y.C. and Lagers, R. (2002), Analytical parametric analysis of contact problem of human buttocks and negative Poisson's ratio foam cushions, *International Journal of Solids and Structures*, 39: 4825-4838.
- [7] Yang, S., Qi, C., Guo, D.M. and Wang, D. (2012), Energy absorption of re-entrant honeycombs with negative Poisson's ratio, *Applied Mechanics and Materials*, 148: 992-995.
- [8] Roderic Lakes. Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, 235:1038-1040, 1987.
- [9] F. Scarpa and F. C. Smith. Passive and MR fluid-coated auxetic PU foam - mechanical, acoustic, and electromagnetic properties. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15:973-979, 2004.
- [10] Wallace Arden Smith. Optimizing electromechanical coupling in piezocomposites using polymers with negative Poisson's ratio. *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium*, 1:661-666, 1991.
- [11] Hui Wan, Hideyuki Ohtaki, Shinya Kotosaka, and Guoming Hu. A study of negative Poisson's ratios in auxetic honeycombs based on a large deflection model. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 23:95-106, 2004.
- [12] L.J. Gibson, M.F. Ashby, G.S. Schajer and C.I. Robertson. The mechanics of two-dimensional cellular materials, 382:25-42, 1982.
- [13] Li Yang. *Structural Design, Optimization and Application of 3D Re-entrant Auxetic Structures*. 2011.
- [14] Teik-Cheng Lim. *Auxetic materials and structures*. Engineering Materials.

## Referencias

---

- [15] Lei Jang, Dustin Pearson and Ken Mackay. Modeling of impact properties of auxetic materials. 2013.
- [16] <http://aenormas.aenor.es/>
- [17] <http://www.nidodeabeja.com/>
- [18] <https://www.experimenta.es/noticias/tecnologia/active-auxetic-material-la-segunda-piel-desarrollada-por-el-mit/>

